

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ АКТИВНОСТЬ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ЛИСТЬЕВ БАЗИЛИКА

Е. М. Кабачевская^{1*}, С. В. Суховеева¹, Ю. В. Трофимов², М. И. Баркун²

УДК 577.344

¹ Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларусь,

Минск, Беларусь; e-mail: kabachevskaya@lab.ibp.org.by

² Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларусь, Минск, Беларусь

(Поступила 5 октября 2023)

Изучено влияние шести экспериментальных источников света (светильников) на основе светодиодов с различными спектрами излучения, моделирующими оптическое излучение, близкое к солнечному, на фотохимическую активность фотосистем (ФС) листьев базилика фиолетового, а также на редокс-состояние реакционного центра P700. Спектры различаются по распределению фотонного потока по основным диапазонам излучения, коррелированной цветовой температуре (КЦТ) и общему индексу цветопередачи (R_a). В результате сравнительного анализа параметров РАМ-флуориметрии определены спектральные диапазоны, обеспечивающие более эффективное протекание фотосинтетических процессов в клетках листьев базилика на стадиях технической спелости и цветения. В частности, растения базилика, выращенные с использованием спектра с КЦТ = 5260 K и R_a = 98, имеют достаточно низкий уровень F_0 , один из самых высоких показателей соотношения F_v/F_m , свойственный растениям в нестрессовых условиях, одни из самых высоких показателей квантового выхода обеих ФС Y(I) и Y(II), а также высокие скорости потока электронов. Перспективны по параметрам РАМ-флуориметрии спектры с КЦТ = 4550 K и R_a = 91, КЦТ = 2820 K и R_a = 81. Наихудшие показатели по изученным параметрам ФСI и ФСII — у спектра с КЦТ = 2990 K и R_a = 97.

Ключевые слова: светодиод, фотосинтез, РАМ-флуориметрия, растение, базилик, закрытая светокультура.

The influence of six experimental light sources (lamps) based on LEDs with different emission spectra, simulating optical radiation close to solar radiation, on the photochemical activity of photosystems (PS) of leaves of purple basil, as well as on the redox state of the P700 reaction center, has been studied. The studied spectra differ in the distribution of photon flux over the main emission spectrum ranges, correlated color temperature (CCT) and general color rendering index (R_a). As a result of a comparative analysis of PAM fluorometry parameters, spectral regions have been identified that ensure more efficient photosynthetic processes in the leaf cells of basil plants at the stages of technical ripeness and flowering. In particular, basil plants grown on a spectrum with a CCT of 5260 K and R_a 98 have a fairly low F_0 level, one of the highest F_v/F_m ratios, characteristic of plants under non-stressful conditions, one of the highest quantum yields of both PS Y(I) and Y(II), as well as high electron flow rates. The spectra with CCT 4550 K, R_a 91, CCT 2820 K, R_a 81 also look promising in terms of PAM fluorimetry parameters. The spectrum with CCT 2990 K and R_a 97 has the worst performance in terms of the studied PSI and PSII parameters.

Keywords: LED, photosynthesis, PAM fluorimetry, plant, basil, indoor light culture.

EFFECT OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF LED ARTIFICIAL LIGHTING SOURCES ON THE FUNCTIONAL ACTIVITY OF THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF BASIL LEAVES
E. M. Kabacheuskaya^{1*}, S. V. Sukhovеeva¹, Yu. V. Trofimov², M. I. Barkun² (¹ Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: kabachevskaya@lab.ibp.org.by; ² Center of LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)

Введение. Свет как физический фактор внешней среды играет ключевую роль в контроле и регуляции внутриклеточных процессов растительного организма на протяжении всей жизни, выполняя в клетке две основные функции — энергетическую и информационную. Первая реализуется в процессе фотосинтеза, в ходе которого энергия света трансформируется в химическую энергию связей органических соединений [1, 2]. Вторая функция заключается в запуске разнообразных адаптивных регуляторных реакций, при этом кванты света, воспринимаемые несколькими группами растительных фоторецепторов, выступают в качестве носителя информации об окружающей среде [3, 4].

В условиях ускоренной урбанизации актуальна проблема круглогодичного обеспечения городского населения качественными продуктами питания растительного происхождения. В зоне умеренного климата, в которой находится и Беларусь, это возможно лишь при интенсивном развитии тепличного хозяйства. Следует отметить, что растительная продукция, полученная в условиях закрытого грунта, характеризуется пониженными потребительскими качествами, в том числе определяющими питательные, органолептические и лечебные свойства растений, по сравнению с растениями, выращенными в естественных условиях. На формирование этих свойств в растительной клетке большое влияние оказывает световой режим.

Исходя из важности светового фактора для развития растений, актуальной представляется идея оптимизировать параметры растительных клеток, важные как для обеспечения роста и развития растений в теплице (в том числе в полностью закрытой светокультуре), так и для улучшения качества растительной продукции, путем подбора оптимального спектрального состава ламп осветительных фитоустановок. В данном аспекте особенно перспективным выглядит сегмент источников света, основанных на применении светодиодов, которые приобретают большую популярность в тепличном производстве за счет того, что они более энергоэффективные и долговечные, чем обычные технологии освещения [5, 6]. Среди преимуществ светодиодных ламп также можно назвать возможность гибкого управления спектральным составом и мощностью оптического излучения при проектировании световых приборов на основе светодиодов. Свет различной длины волн может оказывать существенное влияние на ростовые и метаболические реакции растений, в том числе на структурно-функциональное состояние важнейшего процесса в растительной клетке — фотосинтеза [7, 8]. Регулирование фотосинтеза включает в себя регулирование движения устьиц, роста листьев, структуры хлоропластов, фотосинтетических пигментов, белков и др. Большинство растений имеют самую высокую скорость фотосинтеза при оранжевом и красном освещении. Однако другие составляющие спектра (дальний красный, синий и даже зеленый) также оказывают влияние на фотосинтетический аппарат (ФСА) и другие метаболические процессы в клетках растений [9—12]. Например, синий свет способствует открытию устьиц, зеленый — их закрытию, синий свет может улучшить развитие хлоропластов, комплексный свет красного, синего и зеленого цветов способен увеличивать площадь листьев, а красный свет может увеличить накопление продукции фотосинтеза. Эффекты разного качества света различаются у разных растений, органов и тканей. Таким образом, для оценки эффективности действия того или иного спектра осветительного прибора на рост и развитие растений в закрытом грунте важным этапом является анализ его влияния на функциональное состояние их ФСА.

Цель данной работы — оценка влияния шести экспериментальных спектров на основе светодиодов, моделирующих оптическое излучение, близкое к солнечному, на параметры активности фотосистем (ФС) I и II, регистрируемые методом РАМ-флуориметрии в клетках растений пряно-арomaticкой культуры базилика, при их выращивании в условиях закрытой светокультуры.

Эксперимент. Исследованы листья базилика (*Ocimum basilicum* L.) сорта базилик фиолетовый (ООО “Гавриш”, Россия). Растения выращены из семян в лабораторной световой комнате на двух сконструированных ЦСОТ НАН Беларусь экспериментальных облучательных фитоустановках стеллажного типа с габаритными размерами $2000 \times 1000 \times 400$ мм. В каждой фитоустановке на трех ярусах установлены светодиодные облучательные приборы с различными спектрами излучения, каждая фитоустановка имеет функции регулировки уровня облученности растений и продолжительности фотопериода. Исследовано влияние на функциональную активность фотосинтеза в листьях базилика шести различных спектров излучения, условно обозначенных 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3. Растения базилика выращены в стерильном почвогрунте при температуре 23 ± 2 °C с режимом светового дня 16 ч света /8 ч темноты, при средней облученности 200 мкмоль · квант/($m^2 \cdot s$). Для анализа использованы растения двух групп: первая — в состоянии технической спелости (возраст с момента замачивания семян 35—40 дней, далее обозначается М), вторая — на стадии зацветания (возраст ~60 дней, обозначается С).

Для анализа фотосинтетической активности листьев базилика использована измерительная система для РАМ-флуориметрии DUAL-PAM100 (HeinzWalz, Германия) с модулем регистрации флуоресценции ФСII и двухволновым (830/875 нм) модулем регистрации флуоресценции P700 (реакционного центра ФСI) согласно инструкции к прибору DUAL-PAM-100/DUAL-PAM/F MANUAL. Перед измерением интактные листья базилика адаптировали к темноте в течение 15 мин. Параметры ФС оценивались с использованием следующих режимов освещения листьев в системе РАМ-флуориметра: актиничный свет 131 мкмоль · квант/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$), $\lambda = 635$ нм; насыщающие вспышки 10000 мкмоль · квант/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$), $\lambda = 635$ нм; измерительный свет 0.048 мкмоль · квант/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$), $\lambda = 460$ нм; для оценки параметров ФСI использованы насыщающие вспышки 10000 мкмоль · квант/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) после освещения листьев светом с $\lambda = 730$ нм и измерительный модулированный свет с $\lambda = 875$ и 830 нм [13]. С помощью пакета программ прибора определялись параметры эффективности утилизации света в ходе фотосинтеза. Измерены параметры, характеризующие фотохимическую активность ФСII, и параметры фотохимического и нефотохимического тушения флуоресценции: F_0 , F_m , $Y(\text{II})$, ETR II, NPQ, qN , qP . Дополнительно проведен расчет вариабельной флуоресценции хлорофилла ($F_v = F_m - F_0$) и потенциального квантового выхода ФСII (F_v/F_m). Состояние ФСI оценивалось по следующим показателям: P_m , $Y(\text{I})$, ETR I, $Y(ND)$, $Y(NA)$. Анализ и статистическая обработка экспериментальных данных проведены с помощью пакетов программ Excel и Statistica 8.0. Достоверность данных признавались с учетом коэффициента Стьюдента для принятого уровня значимости $p \leq 0.05$.

Результаты и их обсуждение. Выбранные оригинальные источники света (светильники) на основе светодиодов характеризуются различными спектрами излучения, моделирующими оптическое излучение, близкое к солнечному. При разработке светильников использовались высокоэффективные светодиоды и люминофорные композиции разработки ЦСОТ НАН Беларусь. В табл. 1 представлены данные по распределению фотонного потока по основным диапазонам спектра излучения, коррелированной цветовой температуре (КЦТ) и общему индексу цветопередачи R_a . Анализ фотохимических параметров ФС, показателей тушения флуоресценции хлорофилла (ФлХ), степени окисленности реакционного центра ФСI P700 и других, характеризующих состояние ФСА, проведен в полностью развернувшихся листьях третьего яруса от верхушки растения. В табл. 2 представлены параметры, характеризующие фотохимические и электрон-транспортные процессы ФСII.

Показатель F_0 представляет собой базовый (фоновый) уровень ФлХ при низкой интенсивности света, не вызывающей фотохимических реакций [14]. Как для более молодых, так и для зацветающих растений базилика максимальный уровень F_0 наблюдался для спектров 1.1, 1.3, минимальный — 1.2, 2.1, 2.3. Разница между максимальным и минимальным значениями ~30 %. Высокие значения F_0 указывают на менее эффективную передачу энергии возбуждения между пигментными молекулами в ФСII, например, при тепловом стрессе, увеличение F_0 может быть также связано с понижением эффективности переноса энергии к реакционному центру ФСII, вызванной диссоциацией светособирающего комплекса II от ядра ФС [15], F_m — максимальный уровень ФлХ, вызванный импульсом света после адаптации тканей к темноте [16]. Уменьшение F_m может указывать на то, что исследуемый фотосинтезирующий объект находится в состоянии стресса и не все акцепторы электронов ФСII могут быть полностью восстановлены [15]. По данному показателю максимальное значение (спектр 1.1) превосходит минимальное (спектр 2.1) на 34 %.

Отношение F_v/F_m описывает максимальный фотохимический квантовый выход ФСII — одну из основных характеристик работы ФСА [16, 17]. Этот показатель определяют как отношение количества квантов, используемых в разделении зарядов, к общему количеству квантов, поглощенных светособирающими комплексами. В листьях молодых растений различия по данному показателю между

Т а б л и ц а 1. Распределение фотонного потока по основным диапазонам спектра

Спектр	$\lambda, \text{ нм}$					Цветовая температура, К	Индекс цветопередачи R_a
	380—400	400—500	500—600	600—700	700—780		
1.1	$\leq 0.1\%$	10.7	37.9	45.4	6.0	2820	81
1.2	$\leq 0.1\%$	14.4	27.3	39.5	19.0	4550	91
1.3	$\leq 0.1\%$	10.7	31.8	39.9	17.6	4050	89
2.1	≤ 0.20	23.4	35.2	33.9	6.8	5260	98
2.2	≤ 0.26	9.9	31.5	48.7	9.1	2990	97
2.3	≤ 0.64	17.8	34.9	39.3	7.0	4090	97

Т а б л и ц а 2. Параметры, характеризующие фотохимическую активность ФСII, в зависимости от спектра выращивания растений базилика

Спектр	F_0		F_m		F_v/F_m		$Y(\text{II})$		ETR II	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
1.1	0.67± 0.02 ^a	0.66± 0.09	3.33± 0.14 ^a	2.88± 0.12 ^a	0.8± 0.01	0.77± 0.02	0.44± 0.03 ^a	0.51± 0.02 ^a	25.18± 1.56 ^a	27.95± 0.97 ^a
1.2	0.56± 0.01 ^a	0.49± 0.05 ^a	3.06± 0.07 ^b	2.28± 0.19 ^{a,b}	0.82± 0.002 ^b	0.78± 0.02	0.54± 0.01 ^{a,b}	0.41± 0.04 ^{a,b}	29.52± 0.37 ^{a,b}	22.54± 2.02 ^{a,b}
1.3	0.65± 0.05 ^b	0.73± 0.055 ^{a,b}	2.81± 0.09 ^a	3.13± 0.14 ^{b,c}	0.77± 0.015 ^{b,c}	0.77± 0.02	0.52± 0.01 ^c	0.38± 0.0 ^{a,c}	29.5± 0.37 ^a	21.1± 1.24 ^{a,c}
2.1	0.47± 0.05 ^{a,b}	0.54± 0.03 ^{b,c}	2.46± 0.27 ^a	2.74± 0.13	0.81± 0.002 ^{b,c}	0.8± 0.003 ^a	0.54± 0.01 ^d	0.47± 0.02 ^{c,d}	30.11± 0.79 ^{a,d}	24.4± 1.14 ^d
2.2	0.6± 0.08	0.69± 0.04 ^{a,c}	2.55± 0.18 ^{a,b}	2.83± 0.1 ^b	0.76± 0.03	0.76± 0.02 ^a	0.26± 0.05 ^{a,b,c}	0.26± 0.03 ^{a,b,c,d}	20.78± 2.67 ^{b,c,d}	14.19± 1.57 ^{a,b,c}
2.3	0.55± 0.02 ^a	0.61± 0.002 ^{a,b,c}	2.98± 0.1	2.73± 0.11 ^a	0.81± 0.002 ^c	0.78± 0.01 ^a	0.59± 0.01 ^{a,e}	0.32± 0.02 ^{a,d}	32.71± 0.62 ^{a,b,c}	17± 1.24 ^{a,d}

П р и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 3 и 4 индексами a,b,c,d, e обозначены достоверно различающиеся значения.

спектрами незначительны, в пределах от 0.76—0.77 (спектры 2.2, 1.3) до 0.80—0.82 (спектры 1.1, 2.1, 2.3, 1.2), т. е. различие ~7.5 %.

У растений в фазе начала цветения в целом наблюдалось снижение показателя F_v/F_m по сравнению с более молодыми растениями, однако достоверное снижение имеет место лишь для спектра 2.3. Максимальное значение F_v/F_m у группы растений “C” составляло 0.8 (спектр 2.1), минимальные — 0.76—0.77 (спектры 1.3, 2.2), т. е. различие между максимумом и минимумом ~5 %. Показатель $Y(\text{II})$ отражает эффективный фотохимический квантовый выход ФСII после адаптации растительных тканей к свету [16, 18], максимальные показатели в листьях молодых растений базилика свойственны спектрам 2.3, 1.2, 1.3 (0.54—0.59), минимальное (0.26) — спектру 2.2 (различия между максимальным и минимальным значениями ~50 %). Для растений группы “C” максимальное значение регистрировалось для спектра 1.1, причем оно превосходило не только аналогичные показатели растений того же возраста для других спектров выращивания, но и свои же значения в более молодом возрасте, в то время как на всех остальных спектрах показатель $Y(\text{II})$ у молодых растений был выше.

Показатель ETR II, характеризующий скорость переноса электронов через ФСII [15], в листьях молодых растений варьировался от 20.78 (спектр 2.2) до 32.71 (спектр 2.3). У всех остальных спектров ETR II ближе к 2.3. Значения ETR II в листьях более старых растений понижены по сравнению с молодыми растениями, за исключением спектра 1.1, что в целом сходно с динамикой изменений $Y(\text{II})$. Повышенный уровень показателей $Y(\text{II})$, ETR II, вероятно, свидетельствует о более высокой активности фотосинтетических процессов. В более возрастных растениях данная группа параметров фотохимической активности ФСII в основном снижена, что согласуется с данными для других видов растений, где показано снижение основных параметров РАМ-флуориметрии с возрастом.

Сравнительный анализ данных, описывающих процессы нефотохимического и фотохимического тушения ФСII, представлен в табл. 3. Нефотохимическое тушение характеризует процессы, ассоциированные с диссипацией части энергии, поглощенной в световой фазе фотосинтеза, в виде тепла [15, 18, 19]. Показатель NPQ в листьях молодых и старых растений базилика имеет максимальные значения на спектре 1.1, а у старых растений еще и на спектре 1.3. Минимальные значения NPQ свойственны, независимо от возраста, листьям растений, выросших в спектрах 2.2, 2.3. Разница между максимальным и минимальным значениями NPQ ~50 %. С возрастом показатель NPQ снижался по сравнению с более молодыми листьями, развивавшимися под тем же спектром. Еще одной мерой нефотохимического тушения служит коэффициент qN , который показал схожую с NPQ картину: его максимальные значения свойственны спектру 1.1 у молодых растений и 1.1 и 1.3 у более старых растений; минимальные значения проявлялись при росте растений под лампами со спектрами 2.2, 2.3. Достаточно низкий qN формировался и в спектре 2.1. У более возрастных растений значения qN понижены по сравнению с аналогичными группами молодых растений.

Т а б л и ц а 3. Параметры фотохимического и нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла в зависимости от спектра выращивания растений базилика

Спектр	NPQ		qN		qP	
	M	C	M	C	M	C
1.1	0.51±0.04 ^a	0.34±0.03 ^a	0.39±0.02 ^a	0.28±0.02 ^a	0.63±0.04 ^a	0.7±0.02 ^a
1.2	0.33±0.02 ^a	0.29±0.04 ^b	0.29±0.01 ^a	0.26±0.03 ^b	0.7±0.01 ^b	0.55±0.05 ^{a,b}
1.3	0.33±0.03 ^a	0.37±0.04 ^c	0.30±0.02 ^a	0.32±0.02 ^c	0.74±0.02 ^{a,c,e}	0.54±0.02 ^{a,c}
2.1	0.3±0.02 ^a	0.26±0.01 ^{a,c}	0.27±0.01 ^a	0.24±0.008 ^{c,d}	0.72±0.02 ^{a,d}	0.6±0.02 ^{a,d}
2.2	0.28±0.02 ^a	0.21±0.007 ^{a,b,c}	0.26±0.02 ^a	0.21±0.006 ^{a,c,d}	0.5±0.06 ^{b,c,d,e}	0.35±0.04 ^{a,b,c,d}
2.3	0.24±0.02 ^a	0.19±0.01 ^{a,b,c}	0.22±0.02 ^a	0.19±0.01 ^{a,b,c,d}	0.76±0.02 ^{a,b,e}	0.44±0.03 ^{a,b,d}

Еще один показатель, измеряемый РАМ-флуориметрией — фотохимическое тушение (qP). Данный параметр отражает долю световой энергии, потребляемой открытыми центрами в реакциях фотосинтеза, в общем количестве поглощаемой ФСИ энергии (долю открытых реакционных центров ФСИ) [15, 20]. Данный параметр равен единице, если все реакционные центры открыты и его значения уменьшаются при закрытии реакционных центров за счет насыщения ФС действующим светом.

Оценка зависимости данного параметра от спектра освещения и возраста растений базилика показывает, что разница между максимальными (спектры 2.1 и 1.3) и минимальными (спектр 2.2) вариантами qP составляет ~30 % у молодых растений. У старых растений максимальное значение наблюдалось у спектра 1.1 и 2.1, минимальные — у спектра 2.2. Разница между ними составляла ~50 %. Для большинства спектров с возрастом растений значения qP снижались.

Т а б л и ц а 4. Параметры функциональной активности ФСИ в зависимости от спектра выращивания и возраста растений базилика

Спектр	P_m		$Y(I)$		$Y(ND)$		$Y(NA)$		ETR I	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
1.1	1.13± 0.06 ^a	0.91± 0.11 ^a	0.63± 0.04 ^a	0.76± 0.02 ^a	0.25± 0.03 ^a	0.17± 0.03 ^a	0.12± 0.008 ^a	0.08± 0.008 ^a	34.78± 2.12 ^a	41.58± 1.25 ^a
1.2	1.07± 0.04 ^b	0.63± 0.07 ^b	0.78± 0.02 ^{a,b}	0.67± 0.06 ^b	0.14± 0.02 ^{a,b}	0.2± 0.04 ^b	0.08± 0.006 ^{a,b}	0.07± 0.01 ^b	43.12± 1.11 ^{a,b}	36.7± 3.5 ^b
1.3	1.14± 0.06 ^c	0.54± 0.01 ^a	0.72± 0.02 ^{b,c}	0.67± 0.04 ^{a,c}	0.19± 0.02 ^c	0.24± 0.03 ^c	0.09± 0.009 ^c	0.09± 0.006 ^c	39.57± 1.23 ^{b,c}	36.57± 2.04 ^{a,c}
2.1	0.98± 0.11 ^d	0.75± 0.04 ^{c,d}	0.71± 0.03 ^{b,d}	0.67± 0.04 ^d	0.2± 0.03 ^d	0.25± 0.03 ^d	0.09± 0.005 ^{a,d}	0.08± 0.02 ^d	39± 1.51 ^{b,d}	36.9± 2.05 ^d
2.2	0.63± 0.07 ^{a,b,d,e}	0.72± 0.02 ^{c,e}	0.58± 0.06 ^{b,c,e}	0.38± 0.04 ^{a,b,c,d}	0.23± 0.03 ^b	0.46± 0.03 ^{a,b,c,d}	0.18± 0.035 ^{d,e}	0.16± 0.02 ^{a,b}	32± 3.28 ^{b,c}	20.79± 2.35 ^{a,b,c}
2.3	1.05± 0.07 ^e	0.87± 0.03 ^{b,c,d,e}	0.81± 0.01 ^{a,c,d,e}	0.45± 0.03 ^{a,b,c,d}	0.12± 0.02 ^{a,c}	0.42± 0.02 ^{a,b,c,d}	0.07± 0.008 ^{a,e}	0.12± 0.01 ^{a,b}	44.8± 0.72 ^{a,c}	25.03± 0.73 ^{a,b,c}

Проведен анализ редокс-состояния компонентов ФСИ (табл. 4). Фотоокислительное повреждение ФСИ может вызывать ингибирование роста растений, при этом фотоингибиование ФСИ не происходит до тех пор, пока хлорофилл реакционного центра (P700) окислен, даже в условиях избыточного освещения [21, 22]. У молодых растений базилика параметр P_m минимальный на спектре 2.2 и существенно отличается от всех остальных спектров, для которых значения P_m существенно не различались (0.98—1.14). Для растений в стадии зацветания значения P_m ниже, чем в соответствующих группах молодых растений, самый низкий показатель P_m свойствен спектру 2.2. Эффективный фотохимический квантовый выход ФСИ после адаптации растительных тканей к свету в листьях молодых растений $Y(I)$ в пределах 0.58—0.81, минимальное значение свойственно спектру 2.2. В целом, большинство исследуемых спектров имеют схожие показатели $Y(I)$. Параметры $Y(ND)$ и $Y(NA)$ отражают процессы нефотохимического тушения флуоресценции в ФСИ. $Y(ND)$ характеризует квантовый выход нефотохимической диссипации энергии из-за ограничения со стороны донора, $Y(NA)$ — из-за ограничения со стороны акцептора. $Y(ND)$ указывает на отношение окисленного P700 к общему фотоокисляемому P700, т. е. является показателем окисления P700 [21]. Оба показателя имеют небольшие зна-

чения, особенно $Y(NA)$, что указывает на незначительную активность нефотохимических процессов тушения флуоресценции. Показатель $Y(ND)$ обычно синхронно изменяется с показателем P_m , что свидетельствует о развитии в клетках листьев реакций, защищающих P700 [21]. Также оценивалось состояние скорости потока электронов в ФСI (ETR I). Показатель варьировали от 20.79 (спектр 2.2) до 41.58 (спектр 1.1). Для всех остальных спектров свойственны сходные значения.

Заключение. Изучено влияние шести экспериментальных источников света на основе светодиодов с различными спектрами излучения, моделирующими оптическое излучение, близкое к солнечному, на фотохимическую активность фотосистем листьев базилика. В результате проведенного сравнительного анализа параметров РАМ-флуориметрии можно выделить спектральные диапазоны освещения, обеспечивающие более эффективное протекание фотосинтетических процессов в клетках листьев растений базилика на различных стадиях их физиологического развития. Среди показателей достаточно хорошо зарекомендовали себя несколько спектров. В частности, растения базилика, выращенные на спектре 2.1, имеют достаточно низкий уровень F_0 , один из самых высоких показателей соотношения F_v/F_m , свойственный растениям в нестессовых условиях, одни из самых высоких показателей квантового выхода обеих фотосистем $Y(I)$ и $Y(II)$, а также высокие скорости потока электронов, причем старые растения в данных условиях сохраняют на эффективном уровне многие из этих показателей. Также перспективны по многим параметрам спектры 1.1, 1.2. Наиудьшие показатели по изученным параметрам ФСI и ФСII у спектра 2.2. Исследования проведены на листьях сорта базилик фиолетовый с высоким содержанием фотопротекторов антоцианов, что может влиять на общий ответ растений, и в зеленых листьях реакции могут отличаться. Тем не менее, судя по показателям первичных стадий фотосинтетического процесса, полученные данные показывают принципиальную возможность моделировать в закрытом грунте условия освещения растений, растущих в условиях солнечного освещения в открытом грунте.

- [1] E. Kaiser, Galvis V. Correa, U. Armbruster. Biochem. J., **476**, N 19 (2019) 2725—2741, <https://doi.org/10.1042/BCJ20190134>
- [2] J. A. Cruz, T. J. Avenson. J. Plant. Res., **134**, N 4 (2021) 665—682, <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01321-4>
- [3] O. I. L. Mawphlang, E. V. Kharshiing. Front. Plant. Sci., **8**, 1181 (2017), <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01181>
- [4] И. Д. Волотовский, С. В. Суховеева, Е. М. Кабачевская. Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук, **68**, N 1 (2023) 75—88 [I. D. Volotovski, S. V. Suchoveeva, E. M. Kabachevskaya. Proc. National Academy of Sciences of Belarus. Biological ser., **68**, N 1 (2023) 75—88], <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-75-88>
- [5] S. K. Verma, S. Gantait, B. R. Jeong, S. J. Hwang. Sci. Rep., **8**, 18009 (2018), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36113-9>
- [6] Y. A. Berkovich, I. O. Konovalova, A. N. Erokhin, S. O. Smolyanina, V. G. Smolyanin, O. S. Yakovleva, I. G. Tarakanov, T. M. Ivanov. Life Sci. Space Res. (Amst.), **20** (2019) 93—100, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2018.09.004>
- [7] M. de Wit, V. C. Galvão, C. Fankhauser. Ann. Rev. Plant Biol., **67** (2016) 513—537, <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-112252>
- [8] E. Heyneke, A. R. Fernie. Biochem. Soc. Trans., **46**, N 2 (2018) 321—328, <https://doi.org/10.1042/BST20170296>
- [9] C. Kami, S. Lorrain, P. Hornitschek, C. Fankhauser. Curr. Top Dev. Biol., **91** (2010) 29—66, [https://doi.org/10.1016/S0070-2153\(10\)91002-8](https://doi.org/10.1016/S0070-2153(10)91002-8)
- [10] I. G. Tarakanov, D. A. Tovstyko, M. P. Lomakin, A. S. Shmakov, N. N. Sleptsov, A. N. Shmarev, V. A. Litvinskiy, A. A. Ivlev. Plants, **11**, N 3 (2022) 441, <https://doi.org/10.3390/plants11030441>
- [11] S. Munee, E. J. Kim, J. S. Park, J. H. Lee. Int. J. Mol. Sci., **15**, N 3 (2014) 4657—4670, <https://doi.org/10.3390/ijms15034657>
- [12] G. V. Kochetova, O. V. Avercheva, E. M. Bassarskaya, T. V. Zhigalova. Biophys. Rev., **14**, N 4 (2022) 779—803, <https://doi.org/10.1007/s12551-022-00985-z>
- [13] Т. Г. Курьянчик, Н. В. Козел. Журн. прикл. спектр., **90**, № 3 (2023) 509—515 [T. G. Kuryanchik, N. V. Kozel. J. Appl. Spectr., **90**, N 3 (2023) 509—515]

- [14] **M. R. Fernandes, G. Siqueira-Silva, A. S. João.** Acta Botanica Brasilica, **33** (2019) 558—571, <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0149>.
- [15] **В. Н. Гольцев, Х. М. Каладжи, М. А. Кузманова, С. И. Аллахвердиев.** Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла а – теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений, Ижевск, Институт компьютерных исследований (2014) 50—84 [V. N. Goltsev, M. H. Kalaji, M. A. Kouzmanova, S. I. Allakhverdieu. Variable and Delayed Chlorophyll a Fluorescence – Basics and Application in Plant Sciences, Institute of Computer Sciences (2014) 50—84]
- [16] **H. K. Lichtenthaler, C. Buschmann, M. Knapp.** Photosynthetica, **43**, N 3 (2005) 379—393, <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>
- [17] **C. Guo, L. Liu, H. Sun, N. Wang, K. Zhang, Y. Zhang, J. Zhu, A. Li, Z. Bai, X. Liu, H. Dong, C. Li.** Front. Plant Sci., **13** (2022), <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1007150>
- [18] **C. Klughammer, U. Schreiber.** PAM Appl. Notes, **1** (2008) 27—35
- [19] **S. Tietz, C. C. Hall, J. A. Cruz, D. M. Kramer.** Plant, Cell and Environment, **40** (2017) 1243—1255, <https://doi.org/10.1111/pce.12924>
- [20] **K. Maxwell, G. N. Johnson.** J. Exp. Bot., **51** (2000) 659—668, <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
- [21] **G. Shimakawa, C. Miyake.** Plant Physiol., **179**, N 4 (2019) 1479—1485, <https://doi.org/10.1104/pp.18.01493>
- [22] **H. Sun, Q. Shi, S. B. Zhang, W. Huang.** Plants (Basel), **10**, N 3 (2021) 606, <https://doi.org/10.3390/plants10030606>