

УДК 635

DOI 10.5281/zenodo.17493123

Научная статья



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LED-ОСВЕЩЕНИЯ И ИХ ЭФФЕКТ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПЕТРУШКИ КУДРЯВОЙ (PETROSELINUM CRISPUM MILL.)

USE OF LED LIGHTING AND ITS EFFECTS ON THE PRODUCTIVITY AND QUALITY OF CURLY PARSLEY (PETROSELINUM CRISPUM MILL.)

ЗАХАРОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ,
инженер,

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

СЕМЕНОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА,

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник,

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

СТЕПАНОВА ЕВГЕНИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

ZAKHAROV DMITRY ALEKSEEVICH,
Engineer,

A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences.

SEMENOVA NATALIA ALEKSANDROVNA,

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher,

A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences.

STEPANOVA EVGENIYA VYACHESLAVOVNA,

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Researcher,

A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences.

В работе рассмотрена возможность применения трех приближенных к солнечному свету LED ламп и влияния полученных условий от их использования на морфологию петрушки кудрявой (*Petroselinum crispum*). По результатам, реакция растений на свет сорт-специфична. Сорт «Петра» демонстрирует оптимум вблизи контрольного спектра, а смещение доли зелёного вверх или вниз уменьшает высоту и не даёт достоверных прибавок по массе. «Итальянский богатырь», напротив, положительно отвечает на увеличение зелёного до 50 % и красного до 30 % ростом числа листьев, при тенденции к более компактной морфологии. Таким образом, регулировка спектрального канала позволяет по-разному управлять архитектоникой розетки у двух сортов, а целевые спектра следует подбирать сорт-специфично: для повышения листообразования у «Итальянского богатыря» предпочтителен B15 G50 R30 FR5, для поддержания суммарной продуктивности «Петры» — контрольный B15 G35 R40 FR 10.

This study examined the feasibility of using three LED lamps with spectra approximating sunlight and assessed how the resulting lighting conditions affect the morphology of curly parsley (*Petroselinum crispum*). Plant responses to light were cultivar-specific. cv. 'Petra' showed an optimum near the control spec-

trum; shifting the green fraction either upward or downward reduced plant height and did not produce significant biomass gains. In contrast, cv. 'Italian Giant' responded positively to increasing green to 50% and red to 30%, with a rise in leaf number ($p \leq 0.002$) and a tendency toward a more compact morphology. Thus, adjusting the spectral channels enables differential control of rosette architecture in the two cultivars, and target spectra should be selected in a cultivar-specific manner: to enhance leaf formation in «Italian Giant», B15 G50 R30 FR5 is preferable, whereas to maintain overall productivity in «Petra», the control B15 G35 R40 FR10 is recommended.

Ключевые слова: LED-освещение, *Petroselinum crispum*, физиологические параметры, дальний красный, общий хлорофилл.

Key words: LED lighting, *Petroselinum crispum*, physiological parameters, far-red, total chlorophyll.

Введение. Петрушка — листовой ароматический вид, где целевая продукция включает зелёную биомассу, эфирные масла (мистицен, апиол и др.) и фенольные соединения (апигенин и пр.). Современные LED-системы позволяют конструировать спектр из голубого (B), зелёного (G), красного (R) и дальнего красного (FR) спектра, а также при необходимости добавлять ультрафиолет а и б (UV-A/UV-B). Для петрушки показано, что разные диапазоны спектра по-разному регулируют фотоморфогенез, газообмен, нитратный метаболизм, анатомию листа, профиль вторичных метаболитов и состав эфирного масла. Молекулярная база части этих эффектов хорошо изучена на модельных системах петрушки: UV-B и голубой свет индуцируют экспрессию гена *chalcone synthase* (CHS) и сопутствующих ферментов фенилпропаноидного пути, а дальний красный способен модифицировать траекторию ответа, что объясняет спектральную управляемость фенольного профиля [3; 9].

В тепличном опыте с дополнительным освещением ($100 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) сравнивали с натриевыми лампами (HPS) и две LED-схемы с низкой и высокой долей голубого в B:R = 7:93 и 30:70. У петрушки высота растения под LED были ниже (особенно при высокой доле синего), однако сухая масса не отличалась от обычных натриевых ламп, то есть компактность увеличивалась без потерь по сухой массе [11].

Отдельная линия исследований показывает ценность зеленого спектра: при выращивании петрушки на гидропонике спектры с повышенной долей G (35–50 %) давали наибольшую свежую массу и площадь листьев, а также более высокий суммарный хлорофилл по сравнению с вариантами без зелёного канала [13].

Для микрозелени петрушки монохроматический красный (650 нм) максимизировал свежий сбор и длину черешка (быстрый рост), тогда как смешанный «RGB» (45 % R, 10 % G, 45 % B) давал наибольшую долю сухого вещества и качественный профиль метаболитов [4].

В другом опыте под RGB-и B-светом лист имел более развитый губчатый мезофилл и больший процент межклетников (по сравнению с вариантом под красным спектром), что коррелировало с более высоким антиоксидантным потенциалом, у взрослых растений в теплице при LED увеличивалась доля хлорофилла b. Эти наблюдения указывают на перестройку светособирающего комплекса и фотозащитных механизмов под влиянием коротковолновой части спектра [5; 11].

На клеточных культурах петрушки показано, что UV-B и голубой свет ко-индуцируют транскрипцию CHS и других генов фенилпропаноидного пути, тогда как импульсы дальнего красного (FR) могут сокращать длительность накопления мРНК и тем самым модифицировать итоговый фенольный профиль. На практике это означает, что умеренное включение UV-A и голубого может усиливать фенольную защиту и окраску, а аккуратная дозировка FR — управлять сигналами затенения (рост/компактность) без прямого повышения фотосинтеза [3].

Обобщая сказанное, подбор условий освещения является важной и параметр зависимой задачей, так, при использовании ультрафиолета можно увеличить количества фенольных соединений, а большое содержание дальнего красного, увеличит длину растения, создавая эффект затемнения.

В данной работе рассматриваются новые пропорции синего, зеленого, красного (B:G:R) и влияния полученного спектра на физиологические параметры микрозелени, на примере петрушки кудрявой (*Petroselinum crispum*).

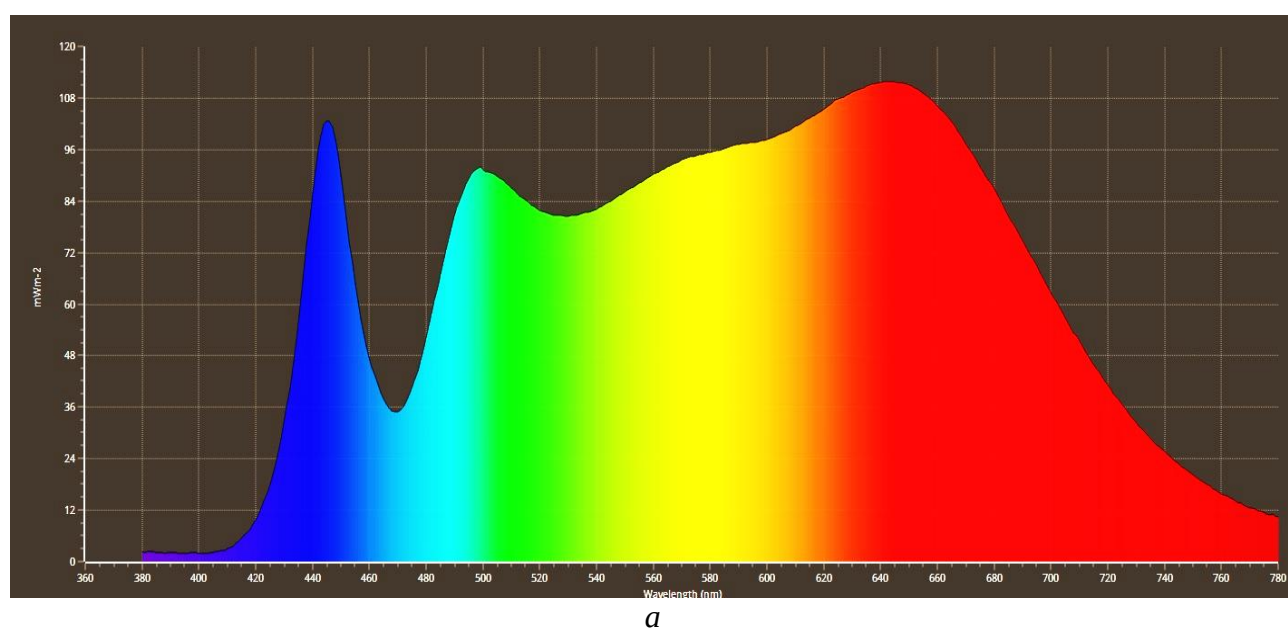
Материалы и методы.

Объектами исследований явились процессы роста и развития растений петрушки кудрявой (*Petroselinum crispum* (Mill.) Fuss) сортов «Петра» и «Итальянский богатырь», выращиваемые методом малообъемной гидропоники, при различных спектральных режимах освещения. Для контроля действия спектрального состава света на разных этапах роста сортов петрушки учеты показателей продуктивности производились в 2 срока — на 45 и 60 день культивирования.

Сорт «Петра» (Bejo) отличается достаточно быстрым возобновлением и отрастанием после срезки, благодаря чему, его часто выращивают в теплицах на салатных линиях. Сорт имеет средний вегетативный срок — 85 дней, обладает приятным ароматом и вкусом, имеет высокую устойчивость к листовым заболеваниям.

«Итальянский богатырь» — среднеспелый сорт, зелень хорошо отрастает после срезки, прекрасно подходит для выгонки зелени в зимне-весенний период, для получения раннего урожая на второй год после посева. Сорт отличается высокой урожайностью около 3,0 кг/м², теневыносливостью, высокими темпами нарастания зелени, хорошим ароматом. Период созревания — около 65–70 дней. В среднем, масса данной листовой петрушки составляет 75 грамм.

Исследования проводили на стеллажах, где поддерживается температурный и влажностный режим, а полив растений проводился методом подтопления. Для приготовления питательных растворов использовался комплекс удобрений для гидропоники «Flora Series» (GHE, Франция) по рекомендованным пропорциям. Электропроводность питательного раствора поддерживали в пределах 1500–1600 мкСм/см. На стеллажах были установлены лампы на основе светодиодных источников света. Спектральный состав света представлен на рисунке 1.



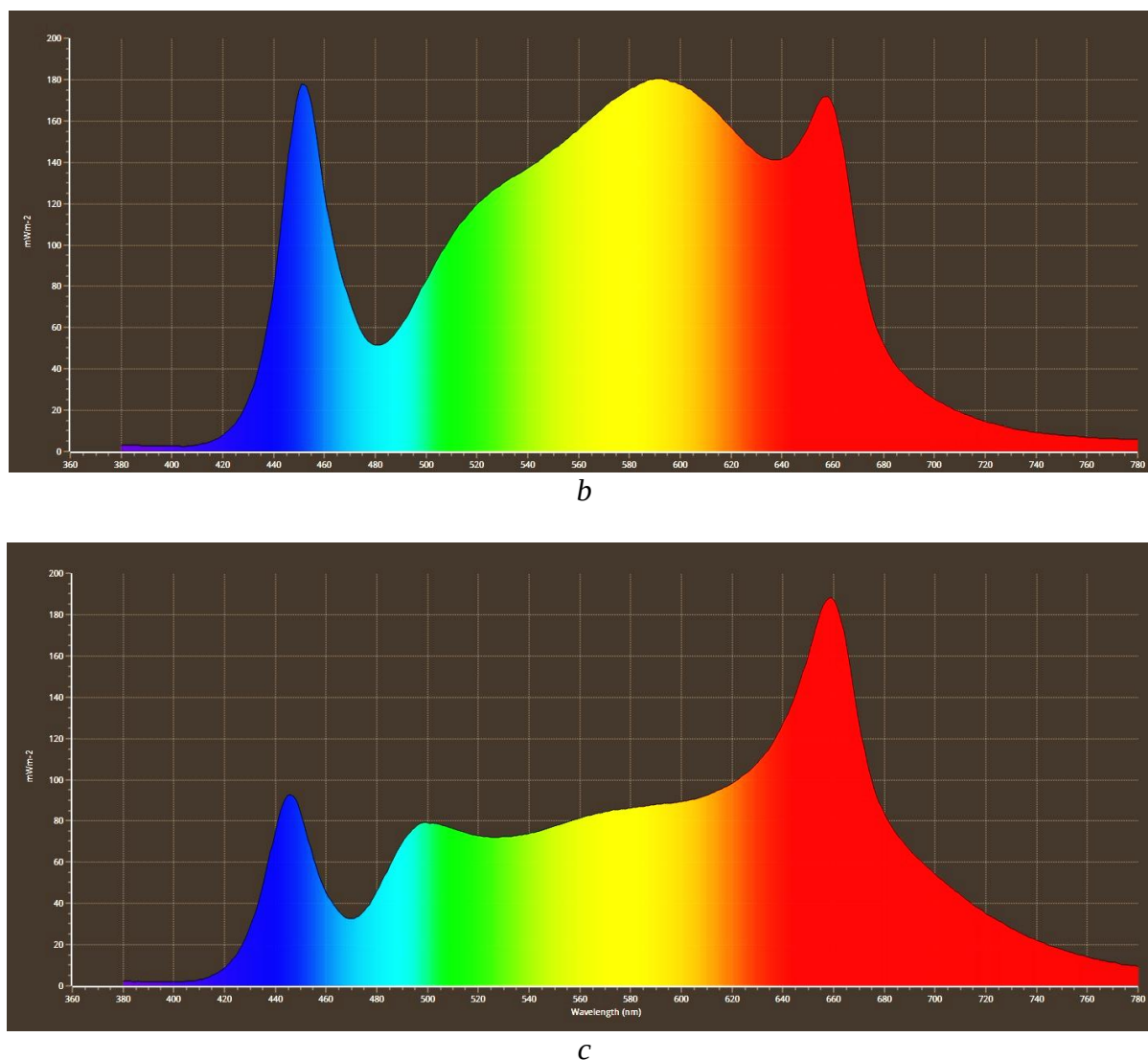


Рис. 1. Спектральный состав света а) Контроль — B15 G35 R40 FR10; б) B15 G50 R30 FR5; в) B15 G25 R50 FR10

Спектральный состав освещения контрольного лотка приближен по пропорциям к солнечному свету — B15 G35 R40 FR10. Освещение первого опытного лотка отличается большей долей зеленого(G) освещения (на 15 %) и меньшей долей красного(R) и дальнего красного(FR) (на 10 и 5 % соответственно), а освещение второго лотка — снижением доли зеленого в общем спектре (на 10 %) и повышением доли красного света (на 10 %) Фотосинтетическая плотность потока фотонов (PPFD) составляла $150 \pm 10 \text{ мкмоль/с} \cdot \text{м}^2$.

Для оценки влияния световых факторов на биометрические показатели листьев растений базилика (масса свежесобранных растений, их высота, сырая масса, содержание сухих веществ) были отобраны единичные образцы растений двух сортов (по 5 шт. с каждого варианта опыта), выращенных на стеллажах с различным световым режимом.

Определение биомассы свежесобранных растений проводилось путем взвешивания каждого единичного растения на лабораторных весах серии GF-3000 (A&D Company, Япония) с точностью до 0,001 г. Определение сухих веществ в биомассе растений проводилось по следующей методике. Из точечных проб, была сформирована объединенная проба, из которой после ее измельчения на частицы размером 1,0–1,5 см и тщательного перемешивания, мето-

дом квартования были выделены средние пробы в 4-х повторностях, которые и использовали для определения содержания сухих веществ. Масса каждой средней пробы включала значения массы 3-х растений в пределах варианта опыта. Сушка подготовленных проб проводилась в два этапа: первый этап – сушка в условиях окружающей среды (20–22°C) до воздушно-сухого состояния. Второй этап – сушка этих же проб до постоянной массы при температуре, не превышающей 105°C. После охлаждения и взвешивания высушенных проб, производился расчет содержания сухих веществ.

Для определения площади листовой поверхности использовали прибор LI-3100C – лабораторный измеритель площади листьев LI-COR, для этого отбирали по пять растений с каждого варианта исследования. У каждого растения отделяли листовые пластинки от черешков. Листовые пластинки поочередно помещали на прозрачную подвижную ленту, проходящую между неподвижных направляющих, и пропускали через систему детекторов. В то время, как образцы проходят под источником света, проекция образца отражается системой трех зеркал и попадает на линейку фоточувствительных элементов. Применение пресс-вала позволило разравнивать неровности укладки листьев. В процессе прохождения образца через систему детекторов показатели площади поверхности, в см² суммируются с точностью до 0,001 см² и считываются со светодиодного дисплея.

Количественный анализ содержания пигментов проводили на 30-й и 45-й дни культивирования. Для анализа во всех изученных вариантах эксперимента было взято по 5 растений каждого сорта петрушки, из каждого растения среди листьев были выбраны по порядку формирования. Для определения количественного содержания хлорофиллов и каротиноидов были отобраны образцы массой 0,1 г. Пигменты были извлечены из тканей растений с помощью х/ч ацетона. Взвешивание проводилось на лабораторных электронных весах (Sartorius LA230S). После фильтрации полученный экстракт анализировали на спектрофотометре SPECS SSP-705 (производство ЗАО «Спектроскопические системы», Россия). Оптическую плотность определяли на следующих длинах волн: 644 нм (пик поглощения хлорофилла в), 662 нм (пик поглощения хлорофилла а) и 440 нм (пик поглощения каротиноидов). Толщина поглощающего слоя в кюветах составляла 10 мм. Количественную концентрацию пигментов определяли методом Холма-Веттштейна [1].

Результаты и обсуждение.

На 30-й день культивирования петрушки кудрявой сформулированы следующие результаты (рис. 2 и табл.1): влияние выбранных световых условий на сорт «Петра», в целом, нейтрально. Однако, относительно контроля, спектры с изменённой долей зелёного канала снижали высоту растений. При B15 G50 R30 FR5 высота составила $11,3 \pm 0,8$ см, что на 13,1 % ниже контроля ($13,0 \pm 0,7$). При варианте с B15 G25 R50 FR10 высота уменьшилась до $11,8 \pm 0,8$ см (9,2 %).



а



b

Рис. 2. Внешний вид растений петрушки кудрявой сорта «Петра» (а) и «Итальянский богатырь» (b) на 30 день культивирования растений в лотках

Свежая масса имела тенденцию к снижению: $1,29 \pm 0,40$ г, ($-26,3$ %) при G50 и $1,35 \pm 0,42$ г ($22,9$ %) при G25, однако различия по массе статистически не подтверждены. Площадь листовой поверхности также была ниже контроля ($-25,2$ % и $-20,1$ % соответственно), но без достоверности ($p = 0,149$ и $p = 0,283$). Число листьев достоверно не изменилось, но присутствует тенденция на снижение: с $4,8 \pm 0,4$ до $4,3 \pm 0,4$ шт., в обоих вариантах. Доля сухого вещества оставалась на уровне контроля $11,7 \pm 1,6$; $11,8 \pm 0,3$ % при G50; и $12,2 \pm 0,8$ % при G25 ($p > 0,5$).

Обобщая, отклонение доли зелёного канала, красного и дальнего красного в обе стороны, приводит к достоверному уменьшению высоты при отсутствии значимых изменений по массе и площади листьев. По числу листьев отмечена тенденция к снижению.

Наблюдение за сортом «Итальянский богатырь», замечено выраженное изменение в листообразовании. Оба спектра увеличивали число листьев относительно контроля ($4,0 \pm 0,1$ шт.), до $5,5 \pm 0,5$ шт. при B15 G50 R30 FR5 ($+37,5$ %) и до $5,0 \pm 0,1$ шт. при B15 G25 R50 FR10 ($+25,0$ %). Данные по высоте имели тенденцию к снижению, но без достоверности: $23,8 \pm 2,6$ см ($-11,9$ %) при G50 и $23,0 \pm 4,4$ см ($-14,8$ %) при G25. Площадь листовой поверхности возрастала до $125,4 \pm 14,1$ см² при G50 ($+29,2$ %) и до $107,1 \pm 52,4$ см² при G25 ($+10,3$ %), но различия не достигли значимости ($p > 0,05$). Свежая масса увеличивалась до $3,66 \pm 0,63$ г ($+16,2$ %) при G50 и до $3,37 \pm 1,51$ г ($+7,0$ %) при G25. Доля сухого вещества была несколько выше при G50 $-13,4 \pm 1,6$ % против $12,0 \pm 1,2$ %, и ниже при G25 ($11,5 \pm 0,8$ %).

Подводя итог для «Итальянского богатыря», увеличение доли зелёного канала до 50 % и снижение доли красного, достоверно стимулирует формирование листьев (без подтверждённого прироста массы), одновременно формируя более компактную розетку (тенденция к снижению высоты). При варианте с B15 G25 R50 FR10 ростовых преимуществ перед контролем по массе/площади не выявлено, но листообразование также усиливается.

Таблица 1. Показатели роста растений петрушки сортов «Петра» и «Итальянский богатырь» на 30 день культивирования в различных условиях освещения, $5n \pm SD$

Вид освещения	Сорт	Сырая масса, г	Сухое вещество, %	Количество листьев	Площадь листовой поверхности, кв.см.	Высота растения, см
B15 G35 R40 FR10	Петра	$1,75 \pm 0,50$	$11,7 \pm 1,6$	$4,8 \pm 0,4$	$34,45 \pm 10,33$	$13,0 \pm 0,7$
	Итальянский богатырь	$3,15 \pm 0,68$	$12,0 \pm 1,2$	$4,0 \pm 0,1$	$97,07 \pm 31,78$	$27,0 \pm 2,5$
B15 G50 R30 FR5	Петра	$1,29 \pm 0,40$	$11,8 \pm 0,3$	$4,3 \pm 0,4$	$25,78 \pm 5,68$	$11,3 \pm 0,8$
	Итальянский богатырь	$3,66 \pm 0,63$	$13,4 \pm 1,6$	$5,5 \pm 0,5$	$125,41 \pm 14,09$	$23,8 \pm 2,6$
B15 G25 R50 FR10	Петра	$1,35 \pm 0,42$	$12,2 \pm 0,8$	$4,3 \pm 0,4$	$27,54 \pm 8,52$	$11,8 \pm 0,8$
	Итальянский богатырь	$3,37 \pm 1,51$	$11,5 \pm 0,8$	$5,0 \pm 0,1$	$107,09 \pm 52,35$	$23,0 \pm 4,4$

По фотосинтетическим пигментам сорт «Петра» уступает сорту «Итальянский богатырь» (рис. 3). По результатам, определено, в сорте «Петра» меньшее содержания хлорофилла «а» чем в «Итальянский богатырь», что косвенно может повлиять на фотосинтетическую активность у сорта в целом. По соотношению хлорофилла, а к хлорофиллу b можно сделать вывод, что растения не испытывали сильного недостатка освещения. Соотношение общего хлорофилла к каротиноидам (4:1, 5:1) говорит о том, что листья хорошо развиваются и отсутствуют процессы старения листового аппарата.

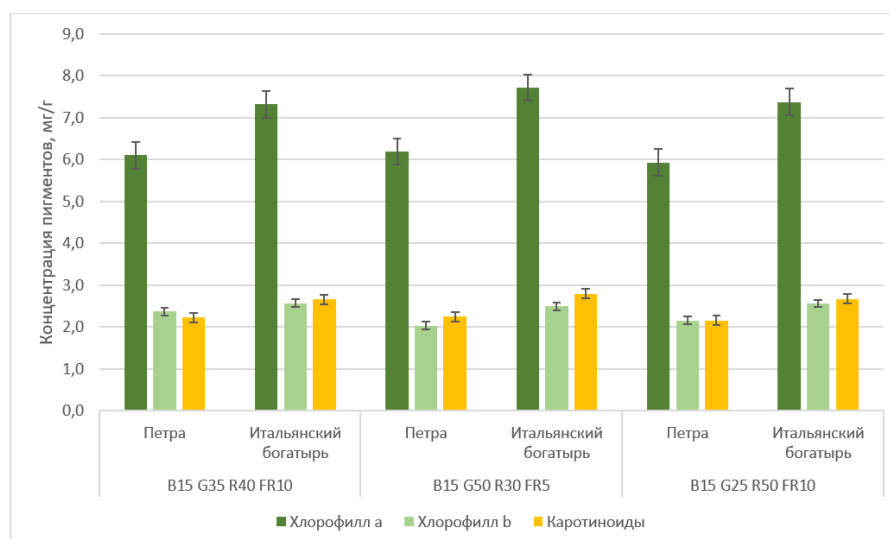


Рис. 3. Средние концентрации основных пигментов фотосинтеза (мг/г) петрушки сортов «Петра» и «Итальянский богатырь» на 30 день культивирования

К 45-м суткам модификация спектрального состава относительно контроля вызывали выражено сортоспецифичные эффекты (рис. 4., табл. 2) У сорта «Петра» понижение доли зелёного до G25 и повышение красного до R50, сопровождалось достоверным уменьшением продуктивности: свежая масса снизилась до $4,37 \pm 0,76$ г (–33,1 %), площадь листьев — до $100,13 \pm 12,80$ см² (–26,9 %). При этом увеличение зелёного до G50 и снижение красного, не влияло на массу и листовую площадь, но в обоих вариантах растения становились достоверно ниже: $17,8 \pm 0,4$ см при G25 (–10,1 %) и $17,3 \pm 1,3$ см при G50 (–12,6 %) по сравнению с $19,8 \pm 1,2$ см в контроле. Число листьев у «Петры» при G50 имело лишь тенденцию к росту: $7,0 \pm 0,7$ против $6,0 \pm 1,1$ (+16,7 %), а доля сухого вещества оставалась статистически неизменной. Таким образом, для «Петры» смещение доли зеленого в сторону 25 % и красного к 50 % приводит к потере биомассы и листовой площади, тогда как повышение до 50 % и красного к 30 % и дальнего красного к 5 % уменьшает растение без потерь урожая. Последнее согласуется с данными о вовлечении зелёного света в перераспределение световой энергии в глубину листового аппарата вероятно, у «Петры» этот механизм проявляется сильнее, чем у второго сорта.



Рис. 4 Внешний вид растений петрушки кудрявой сорта «Петра» (а) и «Итальянский богатырь» (b) на 45 день культивирования растений в лотках.

У сорта «Итальянский богатырь» смена света прежде всего изменяли листовой аппарат. Увеличение доли зелёного до G50 достоверно повышало листообразование: $8,5 \pm 0,5$ листьев против $7,5 \pm 0,5$ в контроле, при G25 наблюдалась лишь незначимая тенденция к снижению до $6,8 \pm 0,8$ (–9,3 %). Свежая масса и площадь листьев изменялись в сторону увеличения, но без статистической достоверности: при G50 масса составила $13,61 \pm 1,81$ г (+6,9 %), площадь $430,29 \pm 16,79$ см² (+14,8 %), при G25 — $11,43 \pm 1,82$ г (–10,2 %) и $342,79 \pm 22,78$ см² (–8,5 %). Высота растений оставалась близкой к контролю, то есть более интенсивное листообразование под G50 происходило без выраженной вытянутости. На фоне этих морфологических сдвигов изменялся водный статус: доля сухого вещества снижалась при уменьшении и, в меньшей степени, при увеличении доли зеленого и красного ($12,9 \pm 1,20$ % при G25, –27,1 %; $15,3 \pm 1,04$ % при G50, –13,6 %).

Таблица 2. Показатели роста растений петрушки сортов «Петра» и «Итальянский богатырь» на 45 день культивирования в различных условиях освещения, $5n \pm SD$

Вид освещения	Сорт	Сырая масса, г	Сухое вещество, %	Количество листьев, шт.	Площадь листовой поверхности, кв.см.	Высота растения, см
B15 G35	Петра	$6,53 \pm 0,53$	$12,5 \pm 1,6$	$6,0 \pm 1,1$	$137,02 \pm 14,28$	$19,8 \pm 1,2$

R40 FR10	Итальянский богатырь	12,73 ±1,84	17,7 ±2,25	7,5±,05	374,69±84,28	37,3±1,92
B15 G50	Петра	6,64 ±1,20	12,8 ±0,28	7,0±0,7	131,93±22,24	17,3±1,3
R30 FR5	Итальянский богатырь	13,61±1,81	15,3 ±1,04	8,5±0,5	430,29±16,79	36,3±1,6
B15 G25	Петра	4,37 ±0,76	14,6 ±4,4	6,3±0,8	100,13±12,80	17,8±0,4
R50 FR10	Итальянский богатырь	11,43 ±1,82	12,9 ±1,2,0	6,8±0,8	342,79±22,78	35,8±2,6

Сорт «Петра» также имел меньшее содержание суммарного хлорофилла чем сорт «Итальянский богатырь» (рис. 7). Соотношение хлорофилла, а к хлорофиллу b показывает, что растения не испытывали недостатка освещения. Соотношение общего хлорофилла к каротиноидам говорит о том, что листья не имеют признаков старения листового аппарата.

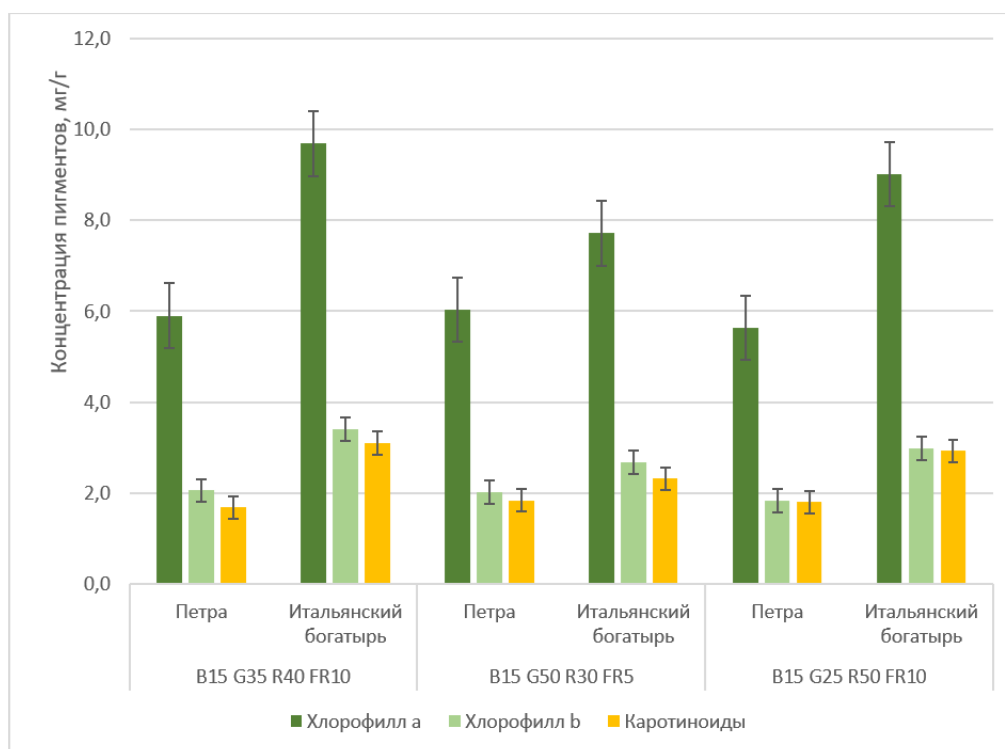


Рис. 5. Средние концентрации основных пигментов фотосинтеза (мг/г) петрушки сортов «Петра» и «Итальянский богатырь» на 45 день культивирования

В целом, динамика между 30-м и 45-м днём показывает, что ранние морфологические признаки предсказывают дальнейшее поведение: у «Петры» негативный эффект B15 G25 R50 FR10 на рост (компактность и снижение листовой поверхности) трансформируется к 45-му дню в уже статистически подтверждённую потерю урожайности, тогда как B15 G50 R30 FR5 закрепляет компактный вариант без потери массы и с выраженным. У «Итальянского богатыря» усиление листообразования под B15 G50 R30 FR5 наблюдается уже к 30-му дню и сохраняется к 45-му при нейтральном влиянии на массу/площадь и высоту; B15 G25 R50 FR10 для этого сорта нежелателен из-за снижения доли сухих веществ к 45-му дню.

Выводы.

Некоторые исследователи отмечают, что дополнительное освещение растений зеленым и дальним красным (FR) светом способно увеличить сырую массу зеленных культур [12]. Зеленый свет увеличивает площадь листовой поверхности и снижает удельный вес листа [6]. Он может лучше проникать в нижние ярусы листьев и способен увеличить рост растений за счет усиления фотосинтеза нижних листьев [7; 8; 10]. Добавка зеленых светодиодов к красно-синему спектру приводит к повышению питательной ценности растений путем поддержания высоких чистых скоростей фотосинтеза и максимальной фотохимической эффективности [2]. Замена синего излучения зеленым и / или дальним красным излучением вызывает реакцию избегания тени, ускоряя рост растений и снижая концентрацию пигментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришина Л.А., Самойлова Е.М. Учет биомассы и химический анализ растений. Москва, 1971. 99 с.
2. Bian Z., Cheng R., Wang Y., Yang Q., Lu C. Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes // *Environmental and Experimental Botany*. 2018. Т. 153. С. 63–71.
3. Bruns B., Hahlbrock K., Schäfer E. Fluence dependence of the ultraviolet-light-induced accumulation of chalcone synthase mRNA and effects of blue and far-red light in cultured parsley cells // *Planta*. 1986. Т. 169, № 3. С. 393–398.
4. Carillo P., El-Nakhel C., De Micco V., Giordano M., Pannico A., De Pascale S., Graziani G., Riti A., Soteriou G. A., Kyriacou M. C., Roupheal Y. Morpho-Metric and Specialized Metabolites Modulation of Parsley Microgreens through Selective LED Wavebands // *Agronomy*. 2022.
5. Carillo P., El-Nakhel C., De Micco V., Giordano M., Pannico A., De Pascale S., Graziani G., Riti A., Soteriou G. A., Kyriacou M. C., Roupheal Y. Morpho-Metric and Specialized Metabolites Modulation of Parsley Microgreens through Selective LED Wavebands // *Agronomy*. 2022. Т. 12, № 7. С. 1502.
6. Claypool N. B., Lieth J. H. Physiological responses of pepper seedlings to various ratios of blue, green, and red light using LED lamps // *Scientia Horticulturae*. 2020. Т. 268. С. 109–371.
7. Kamal K. Y., Khodaei Aminjan M., El-Tantawy A. A., Moneim D. A., Salam A. A., Ash-Shormillesy S., Attia A., Ali M. A. S., Herranz R., El-Esawi M. A., Nassrallah A. A., Ramadan M. F. Evaluation of growth and nutritional value of Brassica microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations // *Physiol Plant*. 2020. Т. 169, № 4. С. 625–638.
8. Kim H. H., Wheeler R. M., Sager J. C., Goins G. D. A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (leds) with and without supplemental green leds 10.17660/ActaHortic.2004.659.62. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, 2004. С. 467–475.
9. Kreuzaler F., Ragg H., Fautz E., Kuhn D. N., Hahlbrock K. UV-induction of chalcone synthase mRNA in cell suspension cultures of *Petroselinum hortense* // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1983. Т. 80, № 9. С. 2591–2593.
10. Li L., Tong Y.-x., Lu J.-l., Li Y.-m., Yang Q. Lettuce Growth, Nutritional Quality, and Energy Use Efficiency as Affected by Red–Blue Light Combined with Different Monochromatic Wavelengths // *HortScience*. 2020. Т. 55. С. 1–8.
11. Litvin A., Currey C., Wilson L. Effects of Supplemental Light Source on Basil, Dill, and Parsley Growth, Morphology, Aroma, and Flavor // *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2019. Т. 145. С. 1–12.
12. Meng Q., Kelly N., Runkle E. S. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale // *Environmental and Experimental Botany*. 2019. Т. 162. С. 383–391.
13. Semenova N. A., Ivanitskikh A. S., Uyutova N. I., Panchenko V. A., Smirnov A. A. Influence of the Ratio of Red and Green Light in the Lighting Spectrum on Growth Indicators and the Component Com-

position of Parsley (*Petroselinum Crispum* (Mill.) Fuss) Essential Oil // Intelligent Computing and Optimization / Под ред. Vasant Р. и др. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. С. 151–160.

Поступила в редакцию: 29.10.2025

Принята в печать: 25.11.2025

© Захаров Д. А., Семенова Н. А.,
Степанова Е. В., 2025.