

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ КРАСНОГО И ДАЛЬНОГО КРАСНОГО СВЕТА НА ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ *IN VITRO*Т. Н. Лисина¹ , О. А. Четина² , Е. А. Елохова² , С. В. Щербёнок^{1,3} 

ORCID

Лисина Т. Н. [0009-0002-0316-0010](https://orcid.org/0009-0002-0316-0010)Четина О. А. [0000-0002-6546-9753](https://orcid.org/0000-0002-6546-9753)Елохова Е. А. [0009-0001-3553-6396](https://orcid.org/0009-0001-3553-6396)Щербёнок С. В. [0009-0002-9610-6207](https://orcid.org/0009-0002-9610-6207)

¹Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал
ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
641532, Россия, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, д. 12;

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, д. 15;

³ФГБОУ ВО Пермский государственный аграрно-технологический университет им. акад. Д. Н. Прянишникова,
614990, Россия, Пермь, ул. 25 Октября, д. 10,
e-mail: atea2@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.03.2025, принята к печати 24.03.2025

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – культура открытого грунта, но лабораторное микроразмножение картофеля (*in vitro*) служит распространенным способом производства безвирусного посадочного материала. Проблема разработки источников и технологий освещения на этапе микроразмножения на современном этапе особенно актуальна. Содержание в спектре освещения излучения длиной 730 нм (дальний красный свет, ДКС) является перспективным в отношении многих сельскохозяйственных растений, культивируемых в тепличных или лабораторных условиях. Для растений важна роль не абсолютного значения количества фотонов ДКС, а соотношения красного света (КС, 600–700 нм) и ДКС (КС/ДКС). При получении фоторецепторами растений информации о снижении КС/ДКС реализуется так называемый синдром избегания тени (shade avoidance syndrome). В данном эксперименте растения культивировали в фитотроне, сконструированном из четырех секторов. Сектора отличались друг от друга соотношением КС/ДКС в спектре освещения: КС/ДКС=9,9 (контрольный сектор); 1,1; 0,8 и 0,5. Целью настоящего исследования стало определение влияния фактора соотношения КС/ДКС на динамику морфометрических показателей, содержание фотосинтетических пигментов и интенсивность фотосинтеза меристемных растений картофеля. На 11-й, 20-й и 28-й дни эксперимента проведена оценка таких биометрических показателей, как длина растений, суммарная площадь листьев, количество междоузлий, масса одного растения. На 20-й и 28-й дни определено содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов, оценена интенсивность фотосинтеза по содержанию органического углерода. По результатам исследования, на 20-й день эксперимента, выявлено достоверное удлинение растений, длина находилась в прямо пропорциональной зависимости от уменьшения соотношения КС/ДКС. Обнаружено увеличение суммарной площади листьев на одно растение на 28-й день эксперимента в вариантах освещения с соотношением КС/ДКС 0,8 и 0,5 соответственно. Достоверное увеличение массы наблюдалось на 28-й день у растений, культивируемых в условиях соотношения КС/ДКС=0,8.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., дальний красный свет, спектр освещения, фотосинтетические пигменты, содержание органического углерода, синдром избегания тени.

EFFECT OF RATIOS OF RED AND FAR-RED LIGHT ON PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS OF POTATO PLANTS *IN VITRO*T. N. Lisina¹, O. A. Chetina², E. A. Elokhova², S. V. Shcherbenok^{1,3}

¹Perm Agricultural Research Institute – division of Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences, 614532, Russia, Perm, St. Culture, 12;

²Perm State University, 614068, Russia, Perm, St. Bukireva, 15;

³Perm State Agrarian-Technological University, 614990, Russia, Perm, st. 25 October, 10,
e-mail: atea2@yandex.ru

Potato is an open-ground crop, but micropropagation of potatoes (*in vitro*) is a common method for producing virus-free planting material. The development of light sources and technologies for the stage of potato micropropagation is an important task of the present time. Presence of 730 nm radiation (far red light, FR) in the light spectrum is promising for many agricultural plants grown in greenhouse or laboratory conditions. It is not the absolute value of the number of FR photons that matters for plants, but the ratio of

red light (R, 600–700 nm) and FR (R/FR). When plant photoreceptors receive information about a decrease in R/FR ratio, the «shade avoidance syndrome» is realized. In this experiment, plants were cultivated in a designed phytotron of four sectors. The sectors differ in the R/FR ratio in the light spectrum: R/FR=9.9 (control sector); 1.1; 0.8 and 0.5. The aim of this study was to determine the effect of the R/FR ratio on the dynamics of morphometric parameters, the content of photosynthetic pigments and the photosynthesis intensity. On the 11th, 20th and 28th days of the experiment, the biometric parameters were assessed: plant length, total leaf area, number of internodes, and the weight of one plant. On the 20th and 28th days, the contents of chlorophylls *a* and *b*, and carotenoids were determined, and the intensity of photosynthesis was estimated based on the content of organic carbon. According to the results of this study, a reliable elongation of plants was recorded on the 20th day of the experiment, the length was directly proportional to the decrease in the R/FR ratio. An increase in the total leaf area per plant was recorded on the 28th day of the experiment in the light options with the R/FR ratio of 0.8 and 0.5. A significant increase in plant weight was noted on the 28th day for plants cultivated under conditions of the R/FR=0.8.

Key words: *Solanum tuberosum* L., far red light, light spectrum, photosynthetic pigments, organic carbon content, shade avoidance syndrome.

ВВЕДЕНИЕ

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – основной продукт питания и одна из основных возделываемых культур в сельском хозяйстве многих стран. В 2024 г. в России площади его выращивания в промышленном секторе картофелеводства составили около 279,8 тыс. га. В отдельных регионах Российской Федерации (РФ) посевные площади картофеля промышленного выращивания достигают 11,0% от общих посевных площадей (АБ-центр, 2025). В условиях глобальных климатических изменений, увеличения численности населения и необходимости укрепления устойчивости продовольственных систем изучение технологий повышения урожайности картофеля становится одной из центральных тем в агрономии и биологии на Урале (Карпухин, Багрецов, 2021). Снижение урожайности этой культуры в первую очередь обусловлено воздействием различных заболеваний, таких как фитофтороз, вирусные инфекции, кольцевая гниль, черная ножка и нематодозы. Микроразмножение картофеля *in vitro* является одним из способов производства безвирусного посадочного материала в больших масштабах (Lommen, 2024). Состояние растений картофеля в конце периода *in vitro* влияет на производительность на этапе акклиматизации в полевых условиях или в условиях защищенного грунта. Например, растения с большей площадью листьев в начале фазы акклиматизации сформировали растения с большей площадью листьев в конце этой фазы (Tadesse et al., 2000).

Свет служит главным источником энергии для фотосинтеза. Посредством оптимизации спектрального состава можно влиять на рост, развитие и продуктивность картофеля в условиях *in vitro* (Лисина и др., 2023). В литературе приведены противоречивые данные о влиянии разнотипного освещения на картофель: существует мнение о том, что освещение, состоящее из красного и синего света, является наиболее эффективным для роста и клубнеобразования картофеля (Xu et al., 2022). Опубликованы и данные о том, что белый свет (полный спектр от красного до синего, включая зеленый и желтый) улучшает клубнеобразование и рост картофеля (Chen et al., 2018). Количество света (фотопериод) также выполняет значимую роль в росте, клубнеобразовании,

фотосинтезе применительно к этой культуре (Raigong et al., 2019; Kondhare et al., 2021).

Дальний красный свет (ДКС) – длинноволновое электромагнитное излучение в диапазоне 700–800 нм. Этот диапазон расположен между красным (КС) и инфракрасным светом и, традиционно его не рассматривают как фотосинтетически активную радиацию (ФАР). ДКС не оказывает прямого влияния на фотосинтез, но количество ДКС информирует растения о состоянии окружающей среды (Park, Runkle, 2017). Фотосинтетические пигменты интенсивно поглощают ФАР, однако пропускают большую часть фотосинтетически неэффективного излучения, к которому относится ДКС (Casal, 2013). Фоторецепторами красной части спектра (600–700 нм) у растений выступают фитохромы, разные формы которых регистрируют и КС, и ДКС части спектра (Smith, 2000). Поэтому важна роль не абсолютного значения количества фотонов ДКС, попадающего на поверхность растений, а соотношения КС и ДКС (КС/ДКС). При получении фоторецепторами растений информации об увеличении доли ДКС реализуется так называемый синдром избегания тени (shade avoidance syndrome, SAS): наблюдаются удлинение органов, междоузлий, появление вытянутых листьев и бледной окраски, что является следствием неполного формирования фотосинтетического аппарата (Casal, 2013). Хотя фотоны ДКС слабо или неэффективно стимулируют фотосинтетическую реакцию, низкий уровень соотношения КС/ДКС, воспринимаемый фоторецепторами фитохромов, может вызывать существенные изменения в экспрессии генов и физиологических процессах.

Вопрос об оптимальном соотношении КС/ДКС в целях получения наибольшего урожая для определенной культуры остается открытым в научном сообществе. Исследователи в мире продолжают изучать диапазон соотношения КС/ДКС для разных культур, имеющих значение в сельском хозяйстве (Ji et al., 2020; Калашникова и др., 2021). ДКС регулирует морфологию и фотосинтетическую способность растений. Выявление механизма этого регулирования может привести к возможности повысить урожайность сельскохозяйственных культур в соответствии с принципами органического (экологического) растениеводства (Tan et al., 2022). Проблема применения ДКС видится важной для условий

защищенного грунта, но малоизученной. Включение ДКС в спектр освещения, как известно, улучшает рост за счет усиления накопления сухой массы в надземных частях (Askari et al., 2024), ускоряет образование клубней (Plantega et al., 2016). Увеличение процентного содержания ДКС в основном спектре освещения позволяет получить рост на 27% содержания белка в тканях растения (Reisi et al., 2024) и большее количество клубней при сохранении их средней массы (Stockem et al., 2023). Скорость роста растений картофеля становится выше под вариантами освещения, в котором присутствует ДКС; увеличивается общее количество клубней и их масса (Chen et al., 2020). Дальнейшие исследования в области изучения механизма влияния ДКС на растения картофеля перспективны для повышения урожайности посредством оптимизации конфигурации растений на этапах производства семенного посадочного материала (Reisi et al., 2024).

Цель настоящего экспериментального исследования – изучить влияние разного соотношения КС/ДКС в спектре освещения на рост, развитие и интенсивность фотосинтеза картофеля *in vitro*.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выбран картофель сорта Невский, являющийся стандартом для научных исследований и относящийся к среднеранней группе спелости. После черенкования меристемные растения указанного сорта в течение 28 суток выращивали в условиях экспериментального фитотрона, состоящего из четырех секторов (1, 2, 3 и 4). Сектора сконструированы идентичными по размерам: 100×50×70 см. В качестве основного освещения использованы светодиодные светильники ECOLED-BIO-37-RF-D120-F-Trade IP65 (4000K). Регистрация спектра освещения проведена портативным спектрометром MK350S Premium. Спектр света, излучаемого светильником, следующий: синий (400–500 нм) – 29,19 мкмоль (м²·с)⁻¹, зеленый (500–600 нм) – 71,00 мкмоль (м²·с)⁻¹, красный (600–700 нм) – 65,61 мкмоль (м²·с)⁻¹, дальний красный (730 нм) – 6,65 мкмоль (м²·с)⁻¹. Интенсивность освещения на уровне нижней поверхности секторов составила 172,45 мкмоль (м²·с)⁻¹. Соотношение КС/ДКС в контрольном секторе – 9,9. Для реализации дополнительного освещения ДКС в секторах 2, 3 и 4 расположены светодиоды с длиной волны 730 нм в разном количестве. Во втором секторе соотношение КС/ДКС составило 1,1; в третьем – 0,8; в четвертом – 0,5. Добавление светодиодов ДКС к источнику белого света, реализованное в настоящем эксперименте, послужило одним из вариантов реализации системы, используемой для исследования реакций избегания

тени. Преимущество этого подхода заключается в том, что растения могут подвергаться воздействию заниженного КС/ДКС без изменения других характеристик окружающей среды. Фотопериод был настроен 16/8 часов.

Всего исследовано 360 меристемных растений, по 90 в каждом из четырех секторов. На 11-й, 20-й и 28-й день по 30 растений из каждого сектора извлекали для исследования. После извлечения из пробирки меристемные растения фотографировали. Определение площади поверхности листовой пластинки и длины растений проводили по оцифрованным изображениям в компьютерной программе ImageJ. Морфометрические параметры измеряли в тридцатикратной повторности, содержание пигментов и органического углерода – в трехкратной.

Определение содержания фотосинтетических пигментов проводили на 20-й и 28-й дни спектрофотометрическим методом, основанным на способности пигментов поглощать лучи определенной длины волны, с помощью спектрофотометра УФ 6100 (Ecoview). Оптическую плотность определяли при $\lambda=440,5$ нм, $\lambda=665$ нм, $\lambda=649$ нм. В качестве растворителя использовали этиловый спирт (96%). Содержание органического углерода оценивали на 20-й и 28-й дни фотоколориметрическим методом по количеству глюкозы в листьях (в пересчете на углерод), путем мокрого сжигания в хромовой смеси.

Полученные данные статистически обработаны с применением методов описательной статистики, критериев омега-квадрат для установления нормальности распределения выборки; Стьюдента и Краскела – Уиллиса – для определения достоверности различий между вариантами (в зависимости от нормальности распределения выборки). Значимыми считали различия между сравниваемыми величинами с доверительной вероятностью 95% и выше ($P \leq 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На 20-й день выявлены достоверные различия по длине растений, культивируемых в разных секторах фитотрона, как видно на рисунке 1. Эти результаты согласуются с литературными данными и могут быть объяснены тем, что низкое соотношение КС/ДКС способствует синтезу ауксина в листьях и опосредованному латеральному его перераспределению в направлении эпидермальных клеток, что объясняет удлинение этих клеток и в целом органа (Tao et al., 2008; Casal, 2013). На 28-й день различия уменьшились, вероятно, ввиду того обстоятельства, что растения в пробирках достигли предельной высоты, так, что пробка стала затенять верхнюю часть растения, то есть растение не получало в целом фотонного потока.

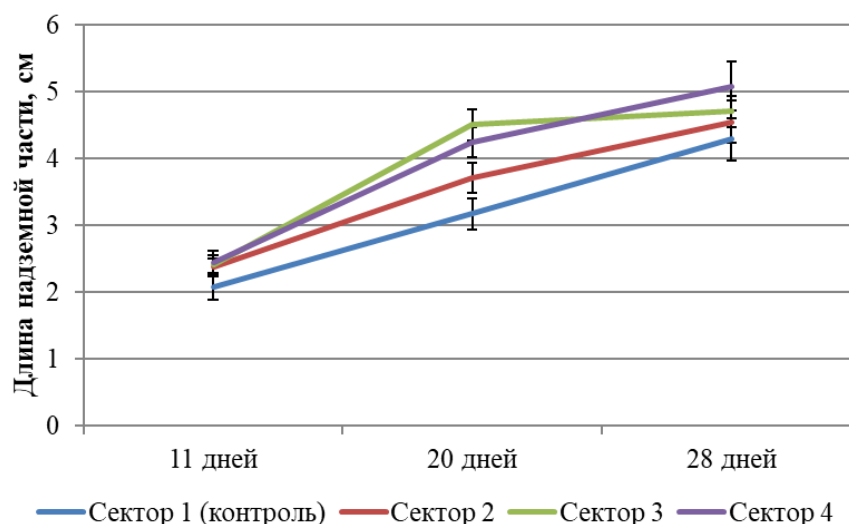


Рис 1. Длина надземной части меристемных растений картофеля в условиях различного соотношения красного и дальнего красного света.

Соотношение красного и дальнего красного света (КК/ДКК) в спектре освещения в секторах фитотрона: сектор 1 (КК/ДКК=9,9); сектор 2 (КК/ДКК=1,1); сектор 3 (КК/ДКК=0,8); сектор 4 (КК/ДКК=0,5)

Результаты по измерению суммарной площади листьев на одно меристемное растение представлены на рисунке 2. На 20-й день значимо, по сравнению с контрольным вариантом, отличалась средняя суммарная площадь листьев в направлении увеличения у растений в секторе 3. На 28-й день эта разница сохранилась, и аналогичный эффект обнаружен в секторе 4. Такой эффект – желаемый результат развития растений, поскольку растения с большей площадью листьев более успешны в начале фазы акклиматизации в полевых условиях или в условиях защищенного грунта (Tadesse et al., 2000).

Количество сформировавшихся междоузлий на одно меристемное растение определяет коэффициент размножения при микроклональном черенковании, так

как растения черенкуют именно по междоузлиям. На рисунке 3 показаны результаты осреднения количества междоузлий на одно растение. Наблюдается тенденция к увеличению количества междоузлий на 28-й день эксперимента.

Результаты по взвешиванию меристемных растений без корневой системы и черенка маточного растения отражены на рисунке 4. Средняя масса одного меристемного растения достоверно отличалась на 20-й и 28-й дни у растений из сектора 3 по сравнению с растениями в контрольном секторе. Это означает, что увеличение площади листьев в секторе 3 происходило не за счет уменьшения толщины листовой пластины.

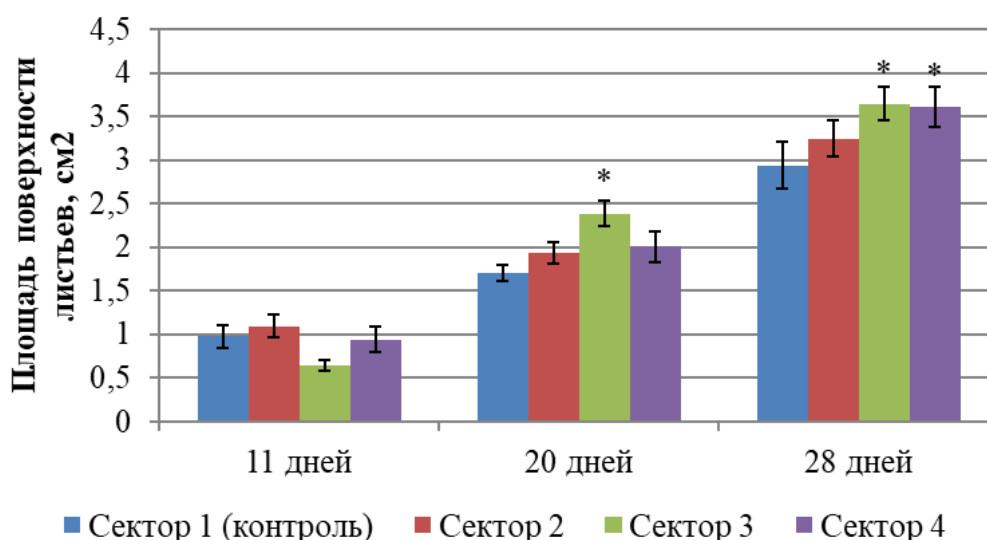


Рис. 2. Площадь поверхности листьев меристемных растений картофеля в условиях различного соотношения красного и дальнего красного света. Звездочкой отмечены значимые различия с контрольным вариантом.

Соотношение красного и дальнего красного света (КК/ДКК) в спектре освещения в секторах фитотрона: сектор 1 (КК/ДКК=9,9); сектор 2 (КК/ДКК=1,1); сектор 3 (КК/ДКК=0,8); сектор 4 (КК/ДКК=0,5)

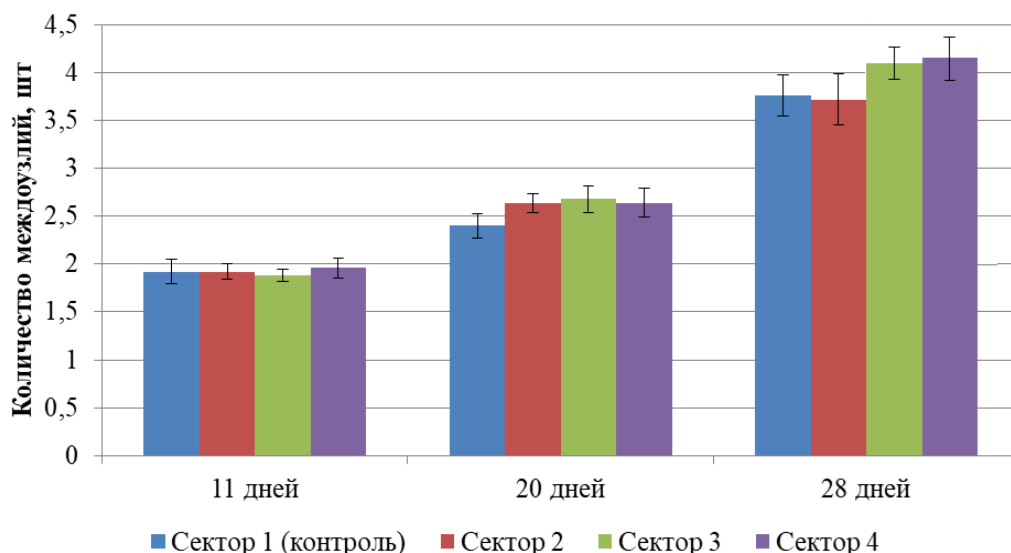


Рис. 3. Количество междоузлий меристемных растений картофеля в условиях различного соотношения красного и дальнего красного света.

Соотношение красного и дальнего красного света (КС/ДКС) в спектре освещения в секторах фитотрона: сектор 1 (КС/ДКС=9,9); сектор 2 (КС/ДКС=1,1); сектор 3 (КС/ДКС=0,8); сектор 4 (КС/ДКС=0,5)

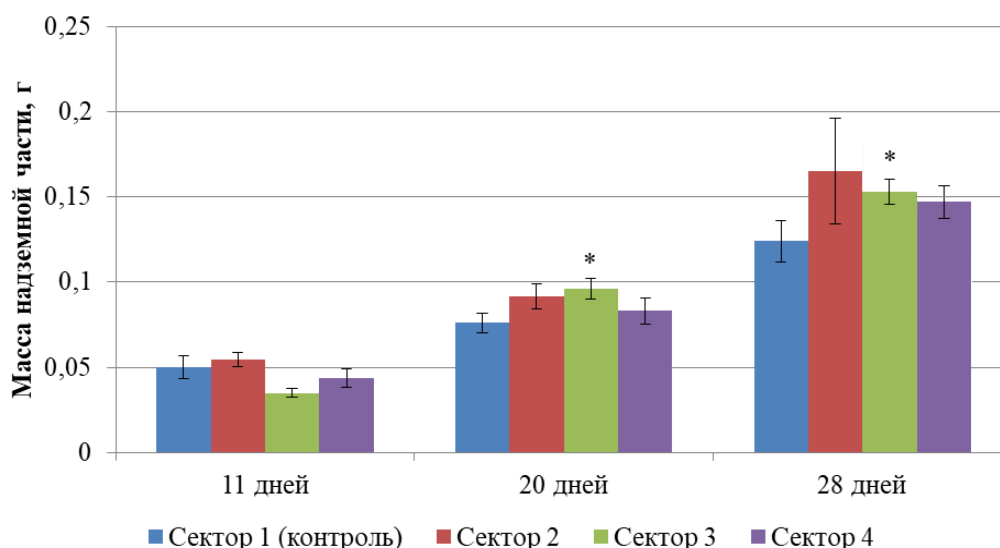


Рис. 4. Масса надземной части меристемных растений картофеля в условиях различного соотношения красного и дальнего красного света. Звездочкой отмечены значимые различия с контрольным вариантом.

Соотношение красного и дальнего красного света (КС/ДКС) в спектре освещения в секторах фитотрона: сектор 1 (КС/ДКС=9,9); сектор 2 (КС/ДКС=1,1); сектор 3 (КС/ДКС=0,8); сектор 4 (КС/ДКС=0,5)

Выявлена закономерность снижения содержания фотосинтетических пигментов при снижении соотношения КС/ДКС, что согласуется с литературными данными об эффекте разбавления при более активном росте. Результаты относительно определения содержания хлорофиллов и каротиноидов представлены на рисунке 5. Реализация синдрома избегания тени выражена в неполном формировании

фотосинтетического аппарата, что подтверждается в проведенном исследовании снижением содержания фотосинтетических пигментов на 28-й день. Интенсивность фотосинтеза у растений в секторах с пониженным соотношением КС/ДКС на 20-й день имела тенденцию к увеличению, но к 28-му дню достоверно снизилась, как видно на рисунке 6.

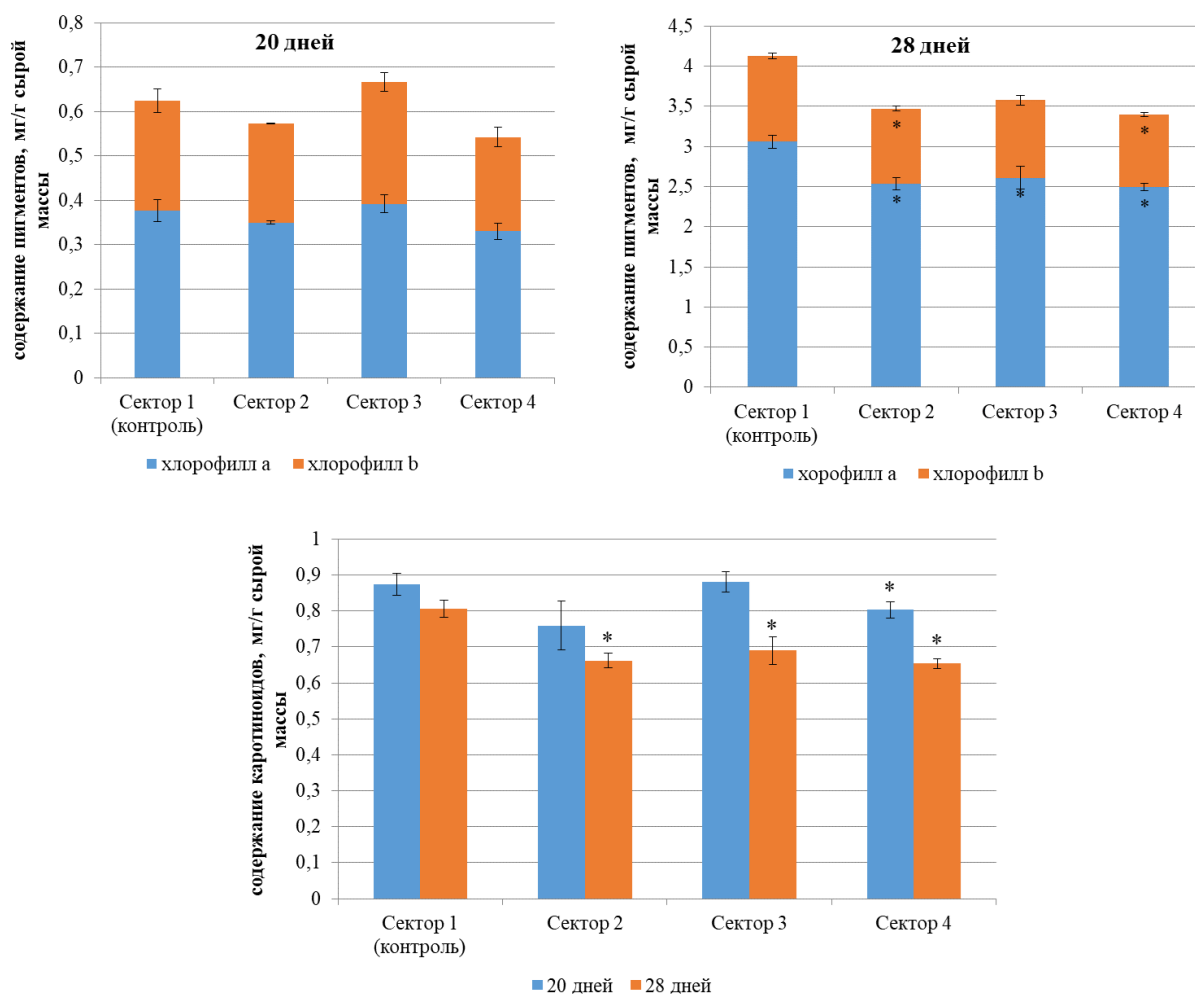


Рис. 5. Содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях меристемных растений картофеля в условиях различного соотношения красного и дальнего красного света. Звездочкой отмечены значимые различия с контрольным вариантом.

Соотношение красного и дальнего красного света (КК/ДКС) в спектре освещения в секторах фитотрона: сектор 1 (КК/ДКС=9,9); сектор 2 (КК/ДКС=1,1); сектор 3 (КК/ДКС=0,8); сектор 4 (КК/ДКС=0,5)

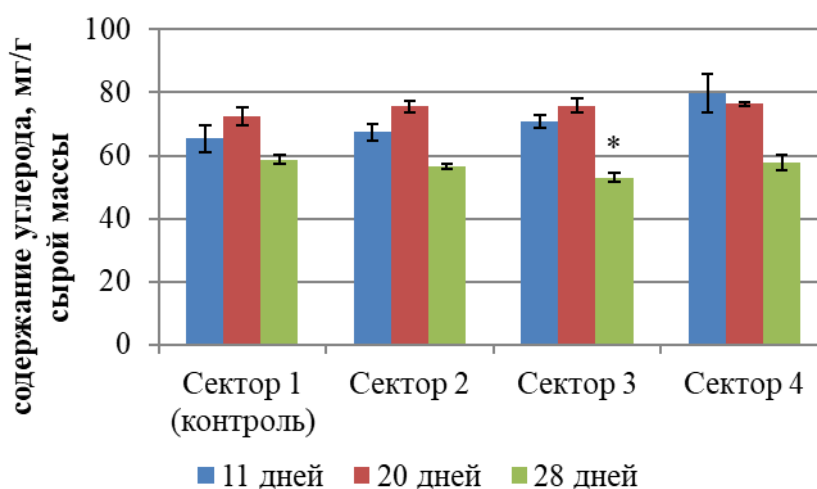


Рис. 6. Содержание углерода в листьях растений картофеля в условиях различного соотношения красного и дальнего красного света. Звездочкой отмечены значимые различия с контрольным вариантом.

Соотношение красного и дальнего красного света (КК/ДКС) в спектре освещения в секторах фитотрона: сектор 1 (КК/ДКС=9,9); сектор 2 (КК/ДКС=1,1); сектор 3 (КК/ДКС=0,8); сектор 4 (КК/ДКС=0,5)

ВЫВОДЫ

В настоящем исследовании подтверждено влияние спектрального освещения на развитие растений картофеля в культуре *in vitro*, в частности соотношения в спектре освещения КС/ДКС. Показано, что для картофеля, как и для ряда других культур, справедливым является утверждение о том, что пониженное соотношение КС/ДКС приводит к реализации синдрома избегания тени. В процессе и по окончании исследования это было выражено в удлинении растений, увеличении суммарной площади листьев на одно растение, удлинении междоузлий, поскольку при увеличенной длине не наблюдали достоверного увеличения количества междоузлий.

По достоверному изменению содержания фотосинтетических пигментов, интенсивности фотосинтеза можно сделать вывод о том, что фактор соотношения КС/ДКС в спектре освещения

прослеживается во всех трех изученных в настоящем исследовании соотношениях: 1,1, 0,8, 0,5. Но желательные для успешного *in vitro* размножения картофеля эффекты (увеличение массы, длины междоузлий) достигаются при соотношении 0,8.

Дальнейшие исследования в контексте изучения механизма влияния ДКС на растения картофеля в условиях *in vitro* перспективны для повышения качества производимого посадочного материала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (тема № 122031100058-3). Авторы благодарны рецензентам за их вклад в экспертную оценку этой работы и ООО «Группа компаний «Световые и Электрические Технологии»» за предоставленные светильники для оборудования фитотрона.

Список литературы

- АБ-центр, Посевные площади картофеля в России в 2024 году, прогноз сборов <https://ab-centre.ru/news/posevnye-ploschadi-kartofelya-v-rossii-v-2024-godu-prognoz-sborov>, дата обращения 10.03.2025).
- Калашникова Е. А., Киракосян Р. Н., Десятерик А. А., Ганаева Д. Р., Абубакаров Х. Г., Слепцов Н. Н. Роль светового режима в регулировании продукционного процесса растений в системе интенсивного культивирования *in vitro* // Естественные и технические науки. 2021. № 5 (156). С. 64–67.
- Карпунин М. Ю., Багрецов Д. Н. Особенности выращивания картофеля на Среднем Урале (сорта и технологии) // Аграрное образование и наука. 2021. № 1. С. 1–6.
- Лисина Т. Н., Бурдышева О. В., Шолгин Е. С. Влияние светодиодного освещения различного спектра на растения картофеля (*Solanum tuberosum* L.) при выращивании *in vitro* (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023. Т. 24, № 6. С. 913–923.
- Askari N., Ghahremani R., Raisi A., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B., Visser R Far-Red Radiation Enhances In Vitro Potato Plantlet Growth by Stimulating Dry Weight Accumulation // Potato Res. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09809-x>
- Casal J.J. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade // Annu. Rev. Plant Biol. 2013. Vol. 64. pp. 403–427.
- Chen L., Xue X., Yang Y., Chen F., Jie Zh., Xi Quan W., Khan Md.T., Hu Y. Effects of red and blue LEDs on in vitro growth and microtuberization of potato single-node cuttings // Front Agric Sci Eng. 2018. Vol. 5. pp. 197–205. <https://doi.org/10.15302/JFASE-2018224>
- Chen L., Zhang K., Gong X.C., Wang H., Gao Y.-H., Xi Quan W., Zeng Zh., Hu Y.-G. Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets in vitro and minituber production after transplanting in the greenhouse // J Integr Agric. 2020. Vol. 19. pp. 108–119. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X)
- Ji Y., Nuñez Ocaña D., Choe D., Larsen D., Marcelis L.F.M., Heuvelink E. Far-red radiation stimulates dry mass partitioning to fruits by increasing fruit sink strength in tomato // New Phytol. 2020. Vol. 228. pp. 1914–1925. <https://doi.org/10.1111/nph.16805>
- Kondhare K.R., Kumar A., Patil N.S., Malankar N.N., Saha K., Banerjee A.K. Development of aerial and belowground tubers in potato is governed by photoperiod and epigenetic mechanism // Plant Physiol. 2021. Vol. 187. pp. 1071–1086 DOI: 10.1093/plphys/kiab409
- Lommen W.J.M. Effects of Age of In Vitro-Derived Potato Plantlets on Early Above- and Below-Ground Development After Planting in Different Cultivars // Potato Res. 2024. Vol. 67. pp. 93–115. <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09621-z>
- Park Y., Runkle E.S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation Environ // Exp. Bot. 2017. Vol. 136. pp. 41–49.
- Plantenga F. D. M., Siakou M., Bergonzi S., Heuvelink E., Bachem C. W. B., Visser R. G. F., & Marcelis L. F. M. Regulating flower and tuber formation in potato with light spectrum and day length // Acta Horticulturae. 2016. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.36>
- Raigond P., Buckseth T., Singh B., Kaundal B., Singh R., Singh B. Influence of photoperiod and EDTA salts on endogenous gibberellic acid concentration of tissue culture grown potato microplants // Agric Res. 2019. Vol. 8. pp. 176–183. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0364-0>
- Reisi A., Askari N., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B., Ghahremani R. Far-red spectrum leads to enhanced in vitro microtuberization in potato (*Solanum tuberosum* cv. Sante) // Plant Cell Tissue Organ Cult. 2024. Vol. 156. pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02673-6>
- Smith H. Phytochromes and light signal perception by plants-an emerging synthesis // Nature. 2000. Vol. 407. pp. 585–591.
- Stockem J. E., de Vries M. E., & Struik P. C. Shedding light on a hot topic: Tuberisation in potato // Annals of Applied Biology. 2023. Vol. 183. №2. pp. 170–180. <https://doi.org/10.1111/aab.12844>
- Tadesse M, Lommen WJM, Struik PC. Effects of vitro treatments on leaf area growth of potato transplants during acclimatization // Plant Cell Tissue Organ Cult. 2000. Vol. 61. pp. 59–67. <https://doi.org/10.1023/A:1006442420153>
- Tao Y., Ferrer JL, Ljung K., Pojer F., Hong F., Long JA, Li L., Moreno JE, Bowman ME, Evans LJ, Cheng Y., Lim J., Zhao Y., Ballaré CL, Sandberg G., Noel JP, Chory J. Rapid synthesis of auxin via a new tryptophan-dependent pathway is required for shade avoidance in plants // Cell. 2008. Vol. 133. pp. 164–176. DOI: 10.1016/j.cell.2008.01.049
- Tingting Tan, Shenglan Li, Yuanfang Fan, Zhonglin Wang, Muhammad Ali Raza, Iram Shafiq, Beibei Wang, Xiaoling Wu, Taiwan Yong, Xiaochun Wang, Yushan Wu, Feng Yang, Wenyu Yang. Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity // The Crop Journal. 2022. Vol. 10. pp. 300–309.

Xu J.M., Liu Y., Liu M.X., Xu Z.G. Proteomic, physiological, and anatomical analyses reveal the effects of red, blue, and white light on the growth of potato plantlets under in vitro culture // Russ J Plant Physiol. 2022. Vol. 69. <https://doi.org/10.1134/S1021443722060346>

References

- Posevnye ploshhadi kartofelja v Rossii v 2024 godu, prognoz sborov* [Potato sowing areas in Russia in 2024, harvest forecast]. AB-centr. <https://ab-centre.ru/news/posevnye-ploshhadi-kartofelya-v-rossii-v-2024-godu-prognoz-sborov>, date of access 10.03.2025).
- Kalashnikova E. A., Kirakosian R. N., Desiaterik A. A., Ganaeva D. R., Abubakarov Kh. G., Sleptsov N. N. Rol' svetovogo rezhima v regulirovanii produktsionnogo protsessa rastenii v sisteme intensivnogo kul'tivirovaniia in vitro [The role of light regime in regulating the production process of plants in the intensive *in vitro* cultivation system] // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2021, no. 5(156), pp. 64.
- Karpukhin M. Iu., Bagretsov D. N. Osobennosti vyrashchivaniia kartofelia na Srednem Urale (sorta i tekhnologii) [Features of potato cultivation in the Middle Urals (varieties and technologies)] // *Agrarnoe obrazovanie i nauka*, 2021, no. 1, pp. 1–6.
- Lisina T. N., Burdysheva O. V., Sholgin E. S. Vliianie svetodiodnogo osveshcheniia razlichnogo spektra na rasteniia kartofelia (*Solanum tuberosum* L.) pri vyrashchivanii in vitro (obzor) [Effect of LED lighting of different spectrum on potato plants (*Solanum tuberosum* L.) during *in vitro* cultivation (review)] // *Agrarnaia nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2023, vol. 24, no. 6, pp. 913–923.
- Askari N., Ghahremani R., Raisi A., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B., Visser R. Far-Red Radiation Enhances In Vitro Potato Plantlet Growth by Stimulating Dry Weight Accumulation // *Potato Res.* 2024. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09809-x>
- Casal J.J. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2013. Vol. 64. pp. 403–427.
- Chen L., Xue X., Yang Y., Chen F., Jie Zh., Xi Quan W., Khan Md.T., Hu Y. Effects of red and blue LEDs on in vitro growth and microtuberization of potato single-node cuttings // *Front Agric Sci Eng.* 2018. Vol. 5. pp. 197–205. <https://doi.org/10.15302/JFASE-2018224>
- Chen L., Zhang K., Gong X.C., Wang H., Gao Y.-H., Xi Quan W., Zeng Zh., Hu Y.-G. Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets in vitro and minituber production after transplanting in the greenhouse // *J Integr Agric.* 2020. Vol. 19. pp. 108–119. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X)
- Ji Y., Nuñez Ocaña D., Choe D., Larsen D., Marcelis L.F.M., Heuvelink E. Far-red radiation stimulates dry mass partitioning to fruits by increasing fruit sink strength in tomato // *New Phytol.* 2020. Vol. 228. pp. 1914–1925. <https://doi.org/10.1111/nph.16805>
- Kondhare K.R., Kumar A., Patil N.S., Malankar N.N., Saha K., Banerjee A.K. Development of aerial and belowground tubers in potato is governed by photoperiod and epigenetic mechanism // *Plant Physiol.* 2021. Vol. 187. pp. 1071–1086. DOI: 10.1093/plphys/kiab409
- Lommen W.J.M. Effects of Age of In Vitro-Derived Potato Plantlets on Early Above- and Below-Ground Development After Planting in Different Cultivars // *Potato Res.* 2024. Vol. 67. pp. 93–115. <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09621-z>
- Park Y., Runkle E.S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation // *Environ Exp. Bot.* 2017. Vol. 136. pp. 41–49.
- Plantenga F. D. M., Siakou M., Bergonzi S., Heuvelink E., Bachem C. W. B., Visser R. G. F., & Marcelis L. F. M. Regulating flower and tuber formation in potato with light spectrum and day length // *Acta Horticulturae.* 2016. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.36>
- Raigond P., Buckseth T., Singh B., Kaundal B., Singh R., Singh B. Influence of photoperiod and EDTA salts on endogenous gibberellic acid concentration of tissue culture grown potato microplants // *Agric Res.* 2019. Vol. 8. pp. 176–183. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0364-0>
- Reisi A., Askari N., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B., Ghahremani R. Far-red spectrum leads to enhanced in vitro microtuberization in potato (*Solanum tuberosum* cv. Sante) // *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 2024. Vol. 156. pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02673-6>
- Smith H. Phytochromes and light signal perception by plants-an emerging synthesis // *Nature.* 2000. Vol. 407. pp. 585–591.
- Stockem J. E., de Vries M. E., & Struik P. C. Shedding light on a hot topic: Tuberisation in potato // *Annals of Applied Biology.* 2023. Vol. 183. №2. pp. 170–180. <https://doi.org/10.1111/aab.12844>
- Tadesse M, Lommen WJM, Struik PC. Effects of vitro treatments on leaf area growth of potato transplants during acclimatization // *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 2000. Vol. 61. pp. 59–67. <https://doi.org/10.1023/A:1006442420153>
- Tao Y., Ferrer JL, Ljung K., Pojer F., Hong F., Long JA, Li L., Moreno JE, Bowman ME, Ivans LJ, Cheng Y., Lim J., Zhao Y., Ballaré CL, Sandberg G., Noel JP, Chory J. Rapid synthesis of auxin via a new tryptophan-dependent pathway is required for shade avoidance in plants // *Cell.* 2008. Vol. 133. pp. 164–176. DOI: 10.1016/j.cell.2008.01.049
- Tingting Tan, Shenglan Li, Yuanfang Fan, Zhonglin Wang, Muhammad Ali Raza, Iram Shafiq, Beibei Wang, Xiaoling Wu, Taiwan Yong, Xiaochun Wang, Yushan Wu, Feng Yang, Wenyu Yang. Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity // *The Crop Journal.* 2022. Vol. 10. pp. 300–309.
- Xu J.M., Liu Y., Liu M.X., Xu Z.G. Proteomic, physiological, and anatomical analyses reveal the effects of red, blue, and white light on the growth of potato plantlets under in vitro culture // *Russ J Plant Physiol.* 2022. Vol. 69. <https://doi.org/10.1134/S1021443722060346>