

С.В. Щербёнок^{1, 2}

¹Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Пермь, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет им. академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

✉ sshcherbenok@bk.ru

Поступила в редакцию: 29.04.2025

Accepted in revised: 12.07.2025

Accepted for publication: 27.07.2025

© Щербёнок С.В.

Research article

 creative commons

Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-397-08-78-83

Sofya V. Shcherbyonok^{1, 2}

¹Perm Agricultural Research Institute — division of Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

²Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

✉ sshcherbenok@bk.ru

Received by the editorial office: 29.04.2025

Accepted in revised: 12.07.2025

Accepted for publication: 27.07.2025

© Shcherbyonok S.V.

Влияние соотношения красного и дальнего красного света на морфометрические показатели картофеля *in vitro*

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Влияние соотношения красного света (660 нм) к дальнему красному свету (730 нм) (КС/ДКС) на рост и развитие растений является важным аспектом биофотоники и растениеводства защищенного грунта.

Методы. Эксперимент проводили в фитотроне, состоящем из двух секторов: первый — с базовым освещением (контроль), второй — с добавочными светодиодами 730 нм. Соотношение КС/ДКС в контрольном секторе составило 9,9, в экспериментальном — 0,5. Был установлен фотопериод — 16 часов, обеспечивающийся таймером Systec. Объектами исследования выбраны растения картофеля сортов Гранд и Джулия *in vitro*, размноженные методом черенкования на агаризованной среде Мурасиге — Скуга. Длительность эксперимента — 28 дней. После извлечения из пробирок меристемные растения были сканированы. Площадь листьев, длину растений и количество междоузлий определяли с помощью программы ImageJ по оцифрованным изображениям растений, массу надземной части — на весах.

Результаты. Результаты показали, что пониженное соотношение КС/ДКС = 0,5 оказывает значимое влияние на морфометрические показатели растений картофеля: длину стебля, площадь листьев, массу надземной части растений. У обоих сортов зафиксировано увеличение длины надземной части растений, однако достоверные различия не выявлены. Увеличение площади листьев под действием добавочного ДКС отмечено у растений обоих сортов: на 54,9% — для сорта Гранд, на 32% — для сорта Джулия. Содержание сухого вещества в листьях растений обоих сортов при пониженном соотношении КС/ДКС оказалось ниже, что может быть связано с перераспределением ресурсов на интенсивный рост и формирование биомассы.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., меристемные растения, дальний красный свет, спектр освещения, сухое вещество

Для цитирования: Щербёнок С.В. Влияние соотношения красного и дальнего красного света на морфометрические показатели картофеля *in vitro*. *Аграрная наука*. 2025; 397(08): 78–83.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-78-83>

The influence of the ratio of red and far-red light on the morphometric parameters of potato *in vitro*

ABSTRACT

Relevance. The influence of red light (660 nm) to far-red light (730 nm) ratio (R/FR) on the growth and development of plants is an important aspect of photobiology and crop raising in green houses protected cultivation.

Methods. The experiment was carried out in a phytotron consisting of two sectors: the first with basic lighting (control), the second with additional 730 nm LEDs. The ratio of CS/DCS in the control sector was 9.9, in the experimental sector — 0.5. A photoperiod of 16 hours was set, provided by a Systec timer. The objects of the study were selected potato plants of the Grand and Julia varieties *in vitro*, propagated by cuttings on Murashige — Skuga agarized medium. The duration of the experiment is 28 days. After extraction from the tubes, the meristemic plants were scanned. The leaf area, plant length, and number of internodes were determined using the ImageJ program from digitized images of plants, and the mass of the aboveground part was measured on scales.

Results. The results showed that a reduced ratio of CS/DCS = 0.5 has a significant effect on the morphometric parameters of potato plants: stem length, leaf area, and the mass of the aboveground part of the plants. In both varieties, an increase in the length of the aboveground part of the plants was recorded, but no significant differences were found. An increase in leaf area under the action of additional DCS was noted in plants of both varieties: by 54.9% for the Grand variety, by 32% for the Julia variety. The dry matter content in the leaves of plants of both varieties turned out to be lower with a reduced ratio of CS/DCS, which may be due to the redistribution of resources for intensive growth and formation of biomass.

Key words: *Solanum tuberosum* L., meristematic plants, far-red light, light spectrum, dry matter

For citation: Shcherbyonok S.V. The influence of the ratio of red and far-red light on the morphometric indicators of potato *in vitro*. *Agrarian science*. 2025; 397(08): 78–83 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-78-83>

Введение/Introduction

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) представляет собой ключевую сельскохозяйственную культуру, обладающую высокой пищевой ценностью, экономической рентабельностью и универсальностью применения [1, 2]. Микрклональное размножение является одним из наиболее эффективных методов получения высококачественного оздоровленного посадочного материала [3]. Этот метод позволяет быстро размножить растения, сохраняя их генетическую однородность и устойчивость к болезням [4].

Рост и развитие меристемных растений, а также дальнейший процесс клубнеобразования представляют собой сложные физиологические процессы, которые регулируются множеством факторов, включая условия окружающей среды, регуляторы роста растений, генетическую структуру, уровень доступных питательных веществ, температурный режим, источник экспланта, сорт картофеля, а также фотопериод и спектр освещения [5].

Свет, включая фотопериод, интенсивность и спектральный состав, играет ключевую роль в окружающей среде, влияя на фотосинтез, развитие и рост растений. В последние десятилетия в условиях защищенного грунта активно внедряются различные системы искусственного освещения, что способствует повышению устойчивости аграрного производства к климатическим изменениям. Таким образом, оптимизация условий освещения становится важным элементом современных сельскохозяйственных технологий.

Красный свет (КС) 600–700 нм является основным источником энергии для фотосинтетических процессов и существенно влияет на рост растений. Дальний красный свет (ДКС) 700–800 нм регулирует прорастание семян, морфогенез, цветение и синтез вторичных метаболитов через фитохромы [6].

В солнечном спектре освещения соотношение КС/ДКС изменяется в течение суток и в среднем составляет 1,3. В промышленных светильниках, предназначенных для использования в условиях защищенного грунта, светодиоды с длиной волны 700–800 нм не применяются, поскольку дальний красный свет традиционно не входит в фотосинтетически активную радиацию (ФАР). В результате в таких светильниках соотношение КС к ДКС достигает 6 и более.

ДКС представляет собой важный элемент фотосинтетического спектра, способствующий регуляции различных физиологических процессов в растениях. В последние годы растет интерес к изучению влияния ДКС на меристемный картофель. Исследования показывают, что ДКС влияет на морфологические характеристики растений, такие как длина стеблей, количество листьев и развитие корневой системы [7–12]. Изучение влияния ДКС на растения важно не только с точки зрения физиологии, но и с точки зрения агрономии

и биотехнологий. В условиях *in vitro*, где растения развиваются в контролируемых условиях, использование различных спектров света может значительно повысить качество и эффективность микрклонального размножения картофеля [13].

У растений отсутствуют фоторецепторы, которые могли бы регистрировать исключительно ДКС, эту функцию выполняют фитохромы, которые являются фоторецепторами для КС [14, 15]. Таким образом, при проектировании искусственного освещения для растений важно учитывать не только количественное содержание ДКС, но и соотношение красного света к дальнему красному свету (КС/ДКС). Это соотношение оказывает значительное влияние на физиологические процессы, такие как фотосинтез, морфогенез, и адаптацию растений к окружающей среде, что в конечном итоге может сказаться на их росте и продуктивности [16–18].

Различные соотношения КС/ДКС оказывают влияние на содержание сухого вещества в растениях. При низком соотношении КС/ДКС растения могут проявлять более выраженные эффекты «вытягивания», что может привести к увеличению длины стеблей и площади листьев, но одновременно это может ограничивать накопление сухого вещества [19]. Правильное регулирование этого соотношения в условиях искусственного освещения может способствовать оптимизации роста растений и повышению их устойчивости к стрессовым факторам [20].

Цель данного экспериментального исследования — изучить влияние пониженного соотношения КС/ДКС = 0,5 в спектре освещения на рост и развитие растений, на содержание сухого вещества растений картофеля сортов Гранд и Джулия *in vitro*.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Научные исследования проводили в Пермском НИИСХ — филиале ПФИЦ УрО РАН в 2025 году. Ранее сотрудниками лаборатории агробиофотоники был сконструирован экспериментальный фитотрон для изучения влияния разного соотношения КС/ДКС на растения [21].

В качестве основного источника света использованы светодиодные светильники ECOLED-BIO-37-RF-D120-F-Trade IP65 (4000K), (ECOLED, Россия). Для введения дополнительной спектральной компоненты к базовому освещению применены светодиодные линейки с диодами, излучающими свет с длиной волны 730 нм.

Секторы фитотрона отличаются по соотношению КС/ДКС. В первом секторе применяется только базовое освещение (контроль) без дополнительных светодиодов с длиной волны 730 нм, соотношение КС/ДКС составляет 9,9. Во втором секторе соотношение КС/ДКС равно 0,5. Фотопериод 16 часов обеспечивался механическим таймером Systec TG-14A (Systec GmbH & Co. KG, Германия).

В качестве объектов исследования были выбраны два сорта картофеля столового назначения — среднеспелый сорт Гранд¹, выведенный специалистами ФИЦ картофеля им. Лорха (Московская обл., Россия), и раннеспелый сорт Джулия², оригинатором которого является ООО «Молянов АгроГрупп» (Самарская обл., Россия).

Микроклональное размножение осуществляли путем черенкования на агаризованной питательной среде Мурасиге — Скуга [22].

Рис. 1. Меристемные растения картофеля сорта Джулия на 28-е сутки культивирования: а) контроль, КС/ДКС = 9,9; б) эксперимент, КС/ДКС = 0,5. Фото автора

Fig. 1. Meristem plants of the Julia variety on the 28th day of cultivation: a) control, R/FR = 9.9; b) experiment, R/FR = 0.5. Photo by the author



Рис. 2. Морфометрические показатели растений картофеля на 28-е сутки культивирования: а) длина надземной части, см; б) площадь листьев, см²
Примечание: * значимые различия между вариантами опыта

Fig. 2. Morphometric parameters of potato plants on the 28th day of cultivation: a) length of the aboveground part, cm; b) leaf area, cm²

Note: * significant differences between variants of the experiment.

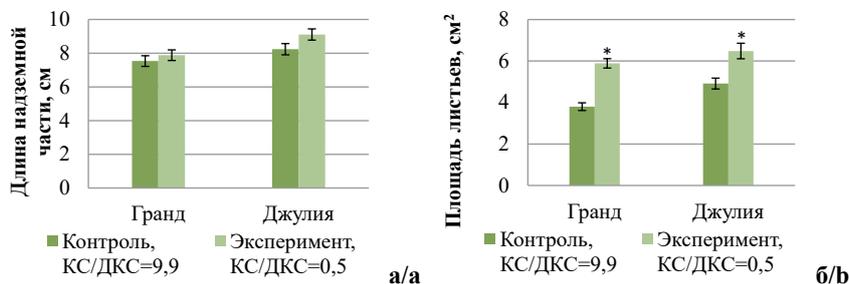


Таблица 1. Эффективность пониженного соотношения КС/ДКС на морфометрические показатели и сухое вещество

Table 1. Efficiency of reduced R/FR ratio on morphometric parameters and dry matter

Сорт картофеля	Вариант	Длина растений, см	Количество междоузлий, шт.	Площадь листьев, см ²	Надземная масса, г	Сухое вещество, %
Гранд	Контроль, КС/ДКС = 9,9	7,532	5,24	3,800	0,135	12,903
	Эксперимент, КС/ДКС = 0,5	7,881	5,64	5,888*	0,175*	11,176
Джулия	Контроль, КС/ДКС = 9,9	8,236	5,08	4,913	0,182	15,052
	Эксперимент, КС/ДКС = 0,5	9,106	5,48	6,483*	0,201	13,817
НСР ₀₅		1,30	0,85	0,72	0,03	0,74

Примечание: * значимые различия между вариантами (* significant differences between variants of the experiment).

¹ Год внесения в реестр — 2016-й. Регион возделывания — 2. Северо-Западный регион — 3. Центральный регион (Россия).

Оригинаторы ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха», ООО «Агроцентр «Коренево», ООО «Молянов АГРО Групп», ИП Глава КФХ Стебаков В.И.

<https://potato.professorhome.ru/variety/grand> Код в реестре РФ 8654295

² Год внесения в реестр — 2023-й. Регион возделывания — 7. Средневожский регион (Россия). Оригинатор ООО «Агростар».

<https://potato.professorhome.ru/variety/dzhuliya> Код в реестре РФ 7954406

³ ГОСТ 33977-2016 Продукты переработки фруктов и овощей. Методы определения общего содержания сухих веществ.

⁴ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат. 1985; 351.

Период культивирования микроклонов картофеля в пробирках длился 28 дней (рис. 1). В каждом варианте опыта использовали 30 растений каждого из двух сортов (всего 120 растений).

После извлечения из пробирки меристемные растения были сфотографированы.

Площадь поверхности листовой пластинки, длину растений и количество междоузлий определяли с помощью оцифрованных изображений в компьютерной программе ImageJ (National Institutes of Health, США), массу надземной части — на аналитических весах «Госметр ВЛ-64», («Госметр», Россия) с пределом точности 0,01 г, сухое вещество — по ГОСТ 33977³.

Для статистической обработки полученных данных использовали метод дисперсионного анализа с определением наименьшей существенной разницы⁴.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты измерений длины растений, площади листьев, количество междоузлий и массы надземной части растений картофеля представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

На сегодняшний день основное внимание в изучении влияния соотношения КС/ДКС сосредоточено на морфологических признаках [23–26]. По длине надземной части растений (рис. 1а) отмечена тенденция увеличения длины в экспериментальном варианте у обоих сортов, однако достоверно значимых различий не обнаружено. По площади листьев (рис. 1б) у обоих сортов в экспериментальном секторе отмечено достоверное повышение этих показателей по сравнению с контролем. У растений сорта Гранд происходит повышение этого показателя на 54,9%, у растений сорта Джулия — на 32% (НСР₀₅ = 0,72).

Изменение соотношения КС/ДКС в спектре освещения приводило к достоверному увеличению надземной массы растений картофеля сорта Гранд. Согласно данным (табл. 1), надземная масса

растений сорта Гранд увеличивалась на 29,4%, а сорта Джулия — на 10% при уровне значимости $HCp05 = 0,03$. Количество междоузлий (табл. 1) увеличивалось при использовании экспериментального освещения, но статистически значимые различия не выявлены.

Результаты согласуются с данными ряда исследований, которые показывают, что изменение спектрального состава освещения, особенно увеличение доли красного света, способствует улучшению фотосинтетической активности и росту растений [16–18, 20]. В частности, исследования Yang et al. [16] демонстрируют, что пониженное соотношение КС/ДКС значительно увеличивает общую биомассу растений. В исследованиях А.А. Смирнова [27] было выявлено, что добавление ДСК в спектр освещения значительно увеличивает количество междоузлий растений огурца (на 15%) и площадь листьев (на 30%).

Известно, что изменение соотношения КС/ДКС может существенно влиять на морфогенез и рост растений, а также на фотосинтетические процессы, действуя через фитохромную систему [28]. Фоторецепторы играют ключевую роль в контроле многих морфометрических характеристик растений.

Результаты данного исследования согласуются с опубликованными исследованиями Askari et al. [31], в которых выявлено увеличение длины стебля и площади листьев у растений картофеля при освещении с пониженным соотношением КС/ДКС, что подтверждает перспективность применения этого варианта освещения для картофеля на стадии *in vitro*. Несмотря на то что при соотношении КС/ДКС = 0,5 растения картофеля показывали наибольшие показатели по длине, площади листьев и надземной массе, по содержанию сухого вещества они имели пониженные показатели (табл. 1).

Такое явление может объясняться тем, что соотношение КС/ДКС = 0,5 способствует интенсивному росту и развитию растений, что в свою очередь приводит к увеличению длины, площади листьев и надземной биомассы. Однако в условиях активного роста растения могут накапливать меньше сухого вещества, поскольку большая часть ресурсов расходуется на увеличение биомассы и формирование новых органов, а не на синтез и накопление запасных веществ. В условиях *in vitro* данное снижение можно рассматривать как незначительное, так как главной задачей микроклонального

размножения является получение большего количества черенков для дальнейшего культивирования.

Существующие литературные данные указывают на разнообразное влияние облучения ДК и соотношения КС/ДКС на ростовые процессы, активность фотосинтетического аппарата и метаболизм [5, 29–32]. Дальнейшие исследования могут выявить механизмы, через которые световые условия влияют на физиологические процессы и адаптацию растений к окружающей среде, что имеет важное значение для сельского хозяйства и агрономии.

Выводы/Conclusions

В данном исследовании рассмотрено влияние пониженного соотношения КС/ДКС в спектре освещения на длину растений, площадь листьев, надземную массу, количество междоузлий, а также на массовую долю сухого вещества. В результате исследований установлено, что растения, выращенные при пониженном соотношении КС/ДКС = 0,5, имеют значимо отличающиеся количественные показатели по сравнению с растениями, которые культивировались в условиях контрольного освещения.

Отмечена тенденция увеличения длины надземной части и количества междоузлий растений картофеля обоих сортов, но достоверных различий не выявлено. В условиях пониженного соотношения у сорта Гранд выявлено значительное увеличение как площади листьев, так и массы надземной части, тогда как у сорта Джулия — только площади листьев.

Содержание сухого вещества в листьях при пониженном КС/ДКС меньше на 13% у сорта Гранд и на 8% у сорта Джулия, но совокупные результаты, включая показатели длины стебля, площадь листьев и надземную массу, позволяют сделать вывод, что исследуемое КС/ДКС является положительным фактором при дальнейшем черенковании.

В реакции на условия освещения присутствует аспект сортоспецифичности: ранний сорт картофеля Джулия и среднеспелый сорт Гранд продемонстрировали отличающиеся реакции на спектральный состав.

Изучение влияния дальнего красного света на меристемный картофель представляет собой актуальное и значимое направление исследований, перспективное для повышения продуктивности и данной культуры.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.
Автор несет ответственность за плагиат.
Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

The author is responsible for the work and the submitted data.
The author is responsible for plagiarism.
The author declared no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания, № регистрации НИОКТР 122031100058-3.

FUNDING

The work was carried out as part of a state assignment, registration number of the research and development project 122031100058-3.

БЛАГОДАРНОСТИ

За предоставленные для исследования меристемные растения картофеля автор благодарит ООО «Молянов АГРО Групп».

За предоставленные для исследования светильники автор благодарит ООО «ГК «Световые и электрические технологии»».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Askari N., Ghahramani R., Reisi A., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B. The Role of Thermal Stress on *In Vitro* Potato Microtuber Induction. *Journal of Vegetables Sciences*. 2023; 6(12–2): 73–84 (на араб. яз.). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2022.562669.1236>
2. Gong H.-L., Dusengemungu L., Igiraneza C., Rukundo P. Molecular regulation of potato tuber dormancy and sprouting: a mini-review. *Plant Biotechnology Reports*. 2021; 15(4): 417–434. <https://doi.org/10.1007/s11816-021-00689-y>
3. Смирнова Ю.Д., Подольян Е.А. Приемы повышения эффективности микроклонального размножения картофеля (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024; 25(3): 319–329. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.319-329>
4. Salem J., Hassanein A.M. *In vitro* propagation, microtuberization, and molecular characterization of three potato cultivars. *Biologia plantarum*. 2017; 61(3): 427–437. <https://doi.org/10.1007/s10535-017-0715-x>
5. 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 and Organ Culture*. 2024; 156(2): 45. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02673-6>
6. Chen C.-L., Yang J.-P., Huang W.-D., Chen C.-C. The Effect of Far-Red Light and Nutrient Level on the Growth and Secondary Metabolites of the *In Vitro* Culture of *Prunella vulgaris*. *Agronomy*. 2023; 13(9): 2250. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092250>
7. Smith H. Light Quality, Photoperception, and Plant Strategy. *Annual Review of Plant Physiology*. 1982; 33: 481–518. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.002405>
8. Park Y., Runkle E.S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. *Environmental and Experimental Botany*. 2017; 136: 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.013>
9. Rahman M.H. *et al.* Effect of Light Quality on Seed Potato (*Solanum tuberosum* L.) Tuberculation When Aeroponically Grown in a Controlled Greenhouse. *Plants*. 2024; 13(5): 737. <https://doi.org/10.3390/plants13050737>
10. Войцеховская О.В. Фитохромы и другие (фото)рецепторы информации у растений. *Физиология растений*. 2019; 66(3): 163–177. <https://doi.org/10.1134/S0015330319030151>
11. Hitz T., Hartung J., Graeff-Hoenninger S., Munz S. Morphological response of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars to light intensity and red to far-red ratio. *Agronomy*. 2019; 9(8): 428. doi.org/10.3390/agronomy9080428
12. Лях П.А., Колошина К.А., Попова К.И., Лях А.А. Влияние спектрального состава светодиодного излучения на рост и развитие растений. *Инновации и продовольственная безопасность*. 2022; (1): 108–120. <https://elibrary.ru/hdxznw>
13. Rehman M. *et al.* Red light optimized physiological traits and enhanced the growth of ramie (*Boehmeria nivea* L.). *Photosynthetica*. 2020; 58(4): 922–931. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.040>
14. Хотамов М.М., Ахмеджанов И.Г. Регуляторная роль фитохрома в устойчивости дыни к фузариозному вилту. *Modern Biology and Genetics*. 2024; (1): 52–70.
15. Tripathi S., Hoang Q.T.N., Han Y.-J., Kim J.-I. Regulation of Photomorphogenic Development by Plant Phytochromes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019; 20(24): 6165. <https://doi.org/10.3390/ijms20246165>
16. Yang F. *et al.* Low red/far-red ratio as a signal promotes carbon assimilation of soybean seedlings by increasing the photosynthetic capacity. *BMC Plant Biology*. 2020; 20: 148. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02352-0>
17. Rahman M.M., Vasiliev M., Alameh K. LED Illumination Spectrum Manipulation for Increasing the Yield of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plants*. 2021; 10(2): 344. <https://doi.org/10.3390/plants10020344>
18. Zhen S., Bugbee B. Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: implications for re-defining photosynthetically active radiation. *Plant, Cell & Environment*. 2020; 43(5): 1259–1272. <https://doi.org/10.1111/pce.13730>

ACKNOWLEDGEMENTS

The author thanks LLC “Molyanov AGRO Group” for providing the meristematic potato plants for the study.

The author also expresses gratitude to LLC «Group of Companies “Lighting and Electrical Technologies”» for providing the lamps used in the research.

REFERENCES

1. Askari N., Ghahramani R., Reisi A., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B. The Role of Thermal Stress on *In Vitro* Potato Microtuber Induction. *Journal of Vegetables Sciences*. 2023; 6(12–2): 73–84 (in Arabian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2022.562669.1236>
2. Gong H.-L., Dusengemungu L., Igiraneza C., Rukundo P. Molecular regulation of potato tuber dormancy and sprouting: a mini-review. *Plant Biotechnology Reports*. 2021; 15(4): 417–434. <https://doi.org/10.1007/s11816-021-00689-y>
3. Smirnova Yu.D., Podolyan E.A. Techniques for increasing the efficiency of microclonal propagation of potatoes (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024; 25(3): 319–329 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.319-329>
4. Salem J., Hassanein A.M. *In vitro* propagation, microtuberization, and molecular characterization of three potato cultivars. *Biologia plantarum*. 2017; 61(3): 427–437. <https://doi.org/10.1007/s10535-017-0715-x>
5. 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 and Organ Culture*. 2024; 156(2): 45. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02673-6>
6. Chen C.-L., Yang J.-P., Huang W.-D., Chen C.-C. The Effect of Far-Red Light and Nutrient Level on the Growth and Secondary Metabolites of the *In Vitro* Culture of *Prunella vulgaris*. *Agronomy*. 2023; 13(9): 2250. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092250>
7. Smith H. Light Quality, Photoperception, and Plant Strategy. *Annual Review of Plant Physiology*. 1982; 33: 481–518. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.002405>
8. Park Y., Runkle E.S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. *Environmental and Experimental Botany*. 2017; 136: 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.013>
9. Rahman M.H. *et al.* Effect of Light Quality on Seed Potato (*Solanum tuberosum* L.) Tuberculation When Aeroponically Grown in a Controlled Greenhouse. *Plants*. 2024; 13(5): 737. <https://doi.org/10.3390/plants13050737>
10. Wojciechowska O.V. Phytochromes and Other (Photo)Receptors of Information in Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2019; 66(3): 351–364. <https://doi.org/10.1134/S1021443719030154>
11. Hitz T., Hartung J., Graeff-Hoenninger S., Munz S. Morphological response of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars to light intensity and red to far-red ratio. *Agronomy*. 2019; 9(8): 428. doi.org/10.3390/agronomy9080428
12. Lyakh P.A., Koloshina K.A., Popova K.I., Lyakh A.A. Influence of the spectral composition of led radiation on plants growth and development. *Innovations and Food Safety*. 2022; (1): 108–120 (in Russian). <https://elibrary.ru/hdxznw>
13. Rehman M. *et al.* Red light optimized physiological traits and enhanced the growth of ramie (*Boehmeria nivea* L.). *Photosynthetica*. 2020; 58(4): 922–931. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.040>
14. Khotamov M.M., Akhmedzhanov I.G. Regulatory role of phytochrome in melon resistance to fusarium wilt. *Modern Biology and Genetics*. 2024; (1): 52–70 (in Russian)
15. Tripathi S., Hoang Q.T.N., Han Y.-J., Kim J.-I. Regulation of Photomorphogenic Development by Plant Phytochromes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019; 20(24): 6165. <https://doi.org/10.3390/ijms20246165>
16. Yang F. *et al.* Low red/far-red ratio as a signal promotes carbon assimilation of soybean seedlings by increasing the photosynthetic capacity. *BMC Plant Biology*. 2020; 20: 148. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02352-0>
17. Rahman M.M., Vasiliev M., Alameh K. LED Illumination Spectrum Manipulation for Increasing the Yield of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plants*. 2021; 10(2): 344. <https://doi.org/10.3390/plants10020344>
18. Zhen S., Bugbee B. Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: implications for re-defining photosynthetically active radiation. *Plant, Cell & Environment*. 2020; 43(5): 1259–1272. <https://doi.org/10.1111/pce.13730>

19. Miyashita Y., Kitaya Y., Kozai T., Kimura T. Effects of red and far-red light on the growth and morphology of potato plantlets *in vitro*: using light emitting diode as a light source for micropropagation. *Acta Horticulturae*. 1995; 393: 189–194. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.393.22>
20. Smith H. Phytochromes and light signal perception by plants — an emerging synthesis. *Nature*. 2000; 407(6804): 585–591. <https://doi.org/10.1038/35036500>
21. Лисина Т.Н., Шолгин Е.С., Бурдышева О.В., Ременникова М.В. Разработка грубокса для изучения влияния дальнего красного света на растения. *Фотон-экспресс*. 2023; (6): 27–28. <https://elibrary.ru/dricvl>
22. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962; 15(3): 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
23. Мартиросян Л.Ю., Кособрюхов А.А., Мартиросян В.В., Мартиросян Ю.Ц. О влиянии различных источников света на фотосинтетические параметры продукционного процесса у *Cucumis sativus* L. (гибрид Тристан F₁) в условиях аэропного фитотрона. *Сельскохозяйственная биология*. 2021; 56(5): 934–947. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2021.5.934rus>
24. Верник П.А. и др. Влияние увеличения доли дальней красной области в полнспектральном светодиодном облучении на рост и развитие растений сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.) в закрытых агробиотехносистемах. *Овощи России*. 2023; (6): 129–135. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-6-129-135>
25. Xu Y., Wang C., Zhang R., Ma C., Dong S., Gong Z. The relationship between internode elongation of soybean stems and spectral distribution of light in the canopy under different plant densities. *Plant Production Science*. 2020; 24(3): 326–338. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1847666>
26. Wang J.L. et al. Far-red light perception by the shoot influences root growth and development in cereal-legume crop mixtures. *Plant and Soil*. 2025; 509(1–2): 969–986. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06903-4>
27. Смирнов А.А. Влияние дальнего красного излучения на рост и продуктивность растения огурец. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020; 67(2): 32–36. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-2-32-36>
28. Morgan P.W., Finlayson S.A., Childs K.L., Mullet J.E., Rooney W.L. Opportunities to Improve Adaptability and Yield in Grasses. *Crop Science*. 2002; 42(6): 1791–1799. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1791>
29. Askari N., Ghahremani R., Raisi A., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B., Visser R.G.F. Far-Red Radiation Enhances *In Vitro* Potato Plantlet Growth by Stimulating Dry Weight Accumulation. *Potato Research*. 2025; 68(2): 1849–1868. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09809-x>
30. Plantenga F.D.M. et al. Regulating flower and tuber formation in potato with light spectrum and day length. *Acta Horticulturae*. 2016; 1134: 267–276. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.36>
31. Stockem J.E., de Vries M.E., Struik P.C. Shedding light on a hot topic: Tuberisation in potato. *Annals of Applied Biology*. 2023; 183(2): 170–180. <https://doi.org/10.1111/aab.12844>
32. Лисина Т.Н., Четина О.А., Парфенкова В.А., Бурдышева О.В., Шолгин Е.С. Влияние соотношения красного и дальнего красного света на рост, содержание пигментов и интенсивность фотосинтеза у кресс-салата. *Физиология растений*. 2024; 71(3): 292–298. <https://doi.org/10.31857/S0015330324030047>
19. Miyashita Y., Kitaya Y., Kozai T., Kimura T. Effects of red and far-red light on the growth and morphology of potato plantlets *in vitro*: using light emitting diode as a light source for micropropagation. *Acta Horticulturae*. 1995; 393: 189–194. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.393.22>
20. Smith H. Phytochromes and light signal perception by plants — an emerging synthesis. *Nature*. 2000; 407(6804): 585–591. <https://doi.org/10.1038/35036500>
21. Lisina T.N., Sholgin E.S., Burdysheva O.V., Remennikova M.V. Development of a grow box for studying the influence of far-red light on plants. *Foton-ekspress*. 2023; (6): 27–28 (in Russian). <https://elibrary.ru/dricvl>
22. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962; 15(3): 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
23. Martirosyan L.Yu., Kosobryukhov A.A., Martirosyan V.V., Martirosyan Yu.Ts. The influence of different light sources on photosynthetic performance and productivity of *Cucumis sativus* L. hybrid Tristan F₁ in aeroponic phytotron facilities. *Agricultural Biology*. 2021; 56(5): 934–947. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2021.5.934eng>
24. Vernik P.A. et al. The effect of increasing the proportion of the far red region in full-spectrum LED irradiation on the growth and development of sugar beet plants (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.) in closed agrobiotechnological systems. *Vegetable crops of Russia*. 2023; (6): 129–135 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-6-129-135>
25. Xu Y., Wang C., Zhang R., Ma C., Dong S., Gong Z. The relationship between internode elongation of soybean stems and spectral distribution of light in the canopy under different plant densities. *Plant Production Science*. 2020; 24(3): 326–338. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1847666>
26. Wang J.L. et al. Far-red light perception by the shoot influences root growth and development in cereal-legume crop mixtures. *Plant and Soil*. 2025; 509(1–2): 969–986. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06903-4>
27. Smirnov A.A. Effect of far-red radiation on the growth and productivity of the cucumber plant. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2020; 67(2): 32–36 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-2-32-36>
28. Morgan P.W., Finlayson S.A., Childs K.L., Mullet J.E., Rooney W.L. Opportunities to Improve Adaptability and Yield in Grasses. *Crop Science*. 2002; 42(6): 1791–1799. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1791>
29. Askari N., Ghahremani R., Raisi A., Sadat-Hosseini M., Parsa Motlagh B., Visser R.G.F. Far-Red Radiation Enhances *In Vitro* Potato Plantlet Growth by Stimulating Dry Weight Accumulation. *Potato Research*. 2025; 68(2): 1849–1868. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09809-x>
30. Plantenga F.D.M. et al. Regulating flower and tuber formation in potato with light spectrum and day length. *Acta Horticulturae*. 2016; 1134: 267–276. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.36>
31. Stockem J.E., de Vries M.E., Struik P.C. Shedding light on a hot topic: Tuberisation in potato. *Annals of Applied Biology*. 2023; 183(2): 170–180. <https://doi.org/10.1111/aab.12844>
32. Lisina T.N., Chetina O.A., Parfenkova V.A., Burdysheva O.V., Sholgin E.S. The Ratio of Red to Far-Red Light Affects Growth, Pigment Content, and Photosynthetic Rates in Cress Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2024; 71(1): 27. <https://doi.org/10.1134/S1021443724604324>

ОБ АВТОРАХ

София Вячеславовна Щербёнок^{1,2}
 младший научный сотрудник¹;
 аспирант²
 sshcherbenok@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9610-6207>

¹ Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук,
 ул. Культуры, 12, с. Лобаново, Пермский край, 641532, Россия

² Пермский государственный аграрно-технологический университет им. академика Д.Н. Прянишникова,
 ул. Петропавловская, 23, Пермь, 614990, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Sofiya Vyacheslavovna Shcherbyonok^{1,2}
 Junior Research Assistant¹;
 Graduate Student²
 sshcherbenok@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9610-6207>

¹ Perm Agricultural Research Institute — Division of Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences,

12 Culture Str., Lobanovo, Perm district, Perm region, 614532, Russia

² Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Prianishnikov,
 23 Petropavlovskaya Str., Perm, 614990, Russia