

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-1-92-97>
УДК 633.63:631.531.011.2

В.Н. Зеленков^{1,*}, В.В. Латушкин²,
С.В. Гаврилов³, П.А. Верник³, М.И. Иванова²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений» 117216, Россия, г. Москва, ул. Грина, д. 7

² Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального государственного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО) 140153, Россия, Московская область, Раменский район, д. Верей, стр. 1500

³ Автономная некоммерческая организация «Институт стратегий развития» 107031, Россия, г. Москва, ул. Петровка, д. 15/13, стр. 5

*Автор для переписки: zelenkov-raen@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Зеленков В.Н., концептуализация идеи и ее проверка на модели проращивания семян сахарной свеклы, руководство научной работой, планирование и организация эксперимента, анализ и оценка результатов, анализ литературы, редактирование статьи. Латушкин В.В., планирование, постановка и проведение экспериментов и их обработка, анализ литературы, оформление статьи и ее редактирование. Верник П.А., планирование эксперимента, обеспечение эксперимента программной частью для функционирования пилотной установки агробиотоники с монохроматическим излучением. Гаврилов С.В., измерение спектральных характеристик светодиодных светильников, оформление пилотной установки с монохроматическим излучением, проведения эксперимента, программное обеспечение эксперимента. Иванова М.И., планирование эксперимента с сахарной свеклой, анализ литературы по тематике, редактирование статьи.

Для цитирования: Зеленков В.Н., Латушкин В.В., Гаврилов С.В., Верник П.А., Иванова М.И. Влияние монохроматического излучения разного спектра на прорастание семян (соплодий) свеклы сахарной (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.). *Овощи России*. 2024; (1):92-97. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-1-92-97>

Поступила в редакцию: 25.11.2023

Принята к печати: 25.01.2024

Опубликована: 19.02.2024

Valery N. Zelenkov^{1,*}, Vyacheslav V. Latushkin²,
Sergey V. Gavrilov³, Petr A. Vernik³,
Maria I. Ivanova²

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants. ароматических растений» 7, Grina str., Moscow, Russia, 117216

² All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center" p. 500, Vereya village, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia

³ Independent NPO Institute for Socio-Economic Strategies and Development Technologies (Institute for Development Strategies) 15/13, bldg. 5, Petrovka str., Moscow, 107031, Russia

*Corresponding Author: zelenkov-raen@mail.ru

Conflict of interest. The authors declare that there are no conflicts of interest.

Authors' Contribution: Zelenkov V.N., conceptualization of the idea and its testing on a model of germination of sugar beet seeds, supervision of scientific work, planning and organization of the experiment, analysis and evaluation of results, literature analysis, manuscript editing. Latushkin V.V., planning, setting up and conducting experiments and their processing, literature analysis, design of the manuscript and its editing. Vernik P.A., planning the experiment, providing the experiment with software for the operation of a pilot installation of agrobiotronics with monochromatic radiation. Gavrilov S.V., measurement of the spectral characteristics of LED lamps, design of a pilot installation with monochromatic radiation, conducting an experiment, experiment software. Ivanova M.I., planning an experiment with sugar beets, analyzing literature on the topic, editing the manuscript.

For citation: Zelenkov V.N., Latushkin V.V., Gavrilov S.V., Vernik P.A., Ivanova M.I. Effect of photons of the far red region in the spectrum of LED radiation on the growth and development of sugar beet plants (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.). 2024; (1):92-97. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-1-92-97>

Received: 25.11.2023

Accepted for publication: 25.01.2024

Published: 19.02.2024

Влияние монохроматического излучения разного спектра на прорастание семян (соплодий) свеклы сахарной (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.)

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность и методология. Задача управления ростом и развитием растений свеклы сахарной с помощью светотехнических устройств представляет интерес с точки зрения выявления биологических особенностей культуры и в селекционной практике. Цель исследований – определить ответную реакцию растений на воздействие низкоэнергетического монохромного излучения на начальном этапе онтогенеза (прорастание семян (соплодий) свеклы сахарной). В этой связи семена гибрида Смена проращивали в темноте (контроль) и при разных вариантах непрерывного светодиодного освещения с длинами волн 380 нм, 440 нм, 525 нм, 660 нм и 730 нм.

Результаты. Реакция семян и ростков свеклы сахарной на освещение монохроматическим светом зависит от длины волны. Проращивание семян при облучении монохроматическим дальним красным светом приводит к снижению энергии прорастания на 23%, всхожести семян на 39%, высоты ростков и надземной биомассы на 21,8% по сравнению с контролем (темновое проращивание). Близкие показатели наблюдали по отрицательному эффекту красного света. Воздействие УФ-А света (380 нм) приводило к повышению энергии прорастания на 4%, однако всхожесть, наоборот, снижалась на 12%. Снижалась также (на 9,9%) наземная биомасса ростков. Облучение зеленым и синим светом благоприятно сказывалось на росте: наземная биомасса увеличилась на 19,8% при зеленом спектре и на 7,3% – синем. При этом не наблюдали снижения энергии прорастания и всхожести по сравнению с контролем. Энергия прорастания под влиянием синего света даже возрастала на 12%. При темновом проращивании на 10 сутки формировались вытянувшиеся этиолированные ростки, тогда как в вариантах зеленого, синего и УФ-А облучения – гармонично развитые темно-зеленые ростки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

монохроматическое излучение, спектральный состав света, сахарная свекла, прорастание семян, синерготрон, биометрические показатели

Effect of photons of the far red region in the spectrum of LED radiation on the growth and development of sugar beet plants (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.)

ABSTRACT

Relevance and methodology. The task of controlling the growth and development of sugar beet plants with the help of lighting devices is of interest from the point of view of identifying biological features of the culture and in breeding practice. The purpose of the research is to determine the response of plants to the effects of low-energy monochrome radiation at the initial stage of ontogenesis (germination of seeds (coplodia) sugar beet). In this regard, the seeds of the hybrid Smena were germinated in the dark (control) and under different variants of continuous illumination with wavelengths of 380 nm, 440 nm, 525 nm, 660 nm and 730 nm.

Results. The reaction of sugar beet seeds and sprouts to illumination with monochromatic light depends on the wavelength Germination of seeds when irradiated with monochromatic far-red light leads to a decrease in germination energy by 23%, seed germination by 39%, the height of sprouts and aboveground biomass by 21.8% compared with the control (dark germination). Similar indicators were observed for the negative effect of red light. Exposure to UV-A light (380 nm) led to an increase in germination energy by 4%, but germination, on the contrary, decreased by 12%. The terrestrial biomass of sprouts also decreased (by 9.9%). Irradiation with green and blue light had a positive effect on growth: the terrestrial biomass of sprouts increased by 19.8% with a green spectrum and 7.3% blue. At the same time, there was no decrease in germination energy and germination compared to the control. The germination energy under the influence of blue light even increased by 12%. With dark germination, elongated etiolated plants were formed on the 10th day, whereas in the variants of green, blue and UV-A irradiation, harmoniously developed dark green shoots were formed.

KEYWORDS:

monochromatic radiation, spectral composition of light, sugar beet, seed germination, synergotron, biometric indicators

Введение

Выращивание растений в регулируемых условиях с использованием светодиодного освещения позволило физиологам воздействовать на рост, метаболизм, продуктивность растений [1,2]. Из способов регулирования наиболее перспективными являются технологии с использованием света различного спектрального состава. В целом, проблема направленной регуляции составляющих продукционного процесса фитоценозов при искусственном облучении является актуальной задачей светофизиологии растений [3,4]. Фотосинтетические и ростовые реакции растений во многом определяются совокупностью параметров освещения: уровень освещенности, спектральный состав, длительность и периодичность освещения [5]. Понимание целостности воздействия света и способов управления освещением дает возможность раскрыть потенциал роста и продуктивности растений. Многочисленными исследованиями установлено, что реакция растений на освещение светом различного состава далеко не всегда является однозначной, и зависит от генотипа и условий выращивания, фенологической фазы и других факторов [6,7].

Наиболее изучено воздействие на растения красного участка спектра, в большинстве исследований отмечается усиление роста у ряда культур [8,9]. Выращивание растений при синем свете в большинстве случаев приводит к снижению интенсивности ростовых процессов и формированию невысоких, крепких растений [10]. В то же время монохроматический синий свет повышает интенсивность фотосинтеза [11]. Установлено значительное влияние синего света на метаболизм и химический состав растений. Так, наибольшее накопление кверцетина, каротиноидов, белка и сухого вещества наблюдалось у капусты Кале на синем участке спектра [12]. Увеличение доли синего спектра при освещении приводит к усилению антиоксидантных свойств растений [6].

Зеленый свет, как следует из данных Мак-Кри и других авторов, не обладает высокой значимостью для фотосинтеза, в отличие от красного и синего спектров. Однако несомненна морфофизиологическая роль зеленого света. В ряде исследований установлено повышение активности ростовых процессов и изменение химического состава растений при облучении зеленым светом [13-15].

УФ-излучения являются в большинстве случаев повреждающими факторами роста и развития растений. В природных условиях истощение озонового слоя приводит к повышенному ультрафиолетовому излучению, которое влияет на рост растений [16]. Ультрафиолетовое излучение в данном случае – его средний диапазон, УФ-В, длина волны 320-280 нм [17]. Развитие адаптивных процессов при действии УФ-радиации на растения во многом находится под контролем системы фитохромов и криптохромов, представляющих собой набор фоторецепторов, работающих вместе с сигнальными системами [16,17]. Однако в отдельных случаях даже УФ-С-излучение (длина волны 280-100 нм) может быть использовано для улучшения физиологических и санитарных свойств семян растений, в частности, содержания касторового масла в определенных дозах (до дозы 20,7 кДж/м², выше которой УФ-С-излучение отрицательно влияет на энергию прорастания семян) [18]. Длинноволновое излучение УФ-А (320-400 нм), в свою очередь, часто благоприятно сказывается на росте и метаболизме растений [19]. Показано, что дополнительное УФ-облучение увеличивало концентрацию каротиноидов и хлорофилла в зеленом листовом салате, одновременно снижая уровни этих соединений в красном листовом салате [20].

Несмотря на проведенные исследования по оценке влияния спектров света на рост и развитие растений, описание ответных реакций остается неизученным в достаточной степени. Особенно это касается такой важной сельскохозяйственной культуры, как свекла сахарная. Поэтому цель данного исследования – изучить реакцию роста растений свеклы сахарной на изменение спектрального состава света при монохроматическом облучении. Задачами исследований, соответственно, являлось изучение влияния низкоэнергетического освещения на морфологические показатели прорастания семян и роста ростков свеклы сахарной.

Методы исследований

Объектом исследований служили семена (соплодия) и растения свеклы сахарной (*B. vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.) гибрида Смена.

Односемянный диплоидный гибрид на стерильной основе N типа Смена включен в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в РФ, в 2010 году. Допущен к использованию в регионах: Центрально-черноземный, Северо-Кавказский. Оригинатором является ФГБУ «Львовская опытно-селекционная станция» (Курская обл.).

В Центрально-Черноземном регионе средняя урожайность корнеплодов – 427 ц/га, содержание сахара – 18,1%, сбор сахара – 77,2 ц/га. Масса корнеплода – 556 г. В Курской области урожайность корнеплодов – 514,5 ц/га, содержание сахара – 17,4%, сбор сахара – 89,2 ц/га, у стандарта Львовский МС 29 соответственно – 475,0 ц/га, 18,0% и 85,2 ц/га. За годы испытаний в полевых условиях наблюдалось очень слабое поражение корневыми гнилями, церкоспорозом, средне - мучнистой росой, выше среднего – корнеедом. В Северо-Кавказском регионе средняя урожайность корнеплодов 412,0 ц/га, содержание сахара – 17,3%, сбор сахара – 75,8 ц/га, у стандарта Кубанский МС 74 – соответственно 398 ц/га, 17,7% и 74,5 ц/га. Масса корнеплода – 531 г. В Краснодарском крае превысил тот же стандарт по урожайности корнеплодов на 52,1 ц/га, содержанию сахара – на 0,1%, сбору сахара – на 11,0 ц/га при уровне соответственно 512,5 ц/га, 16,9% и 84,2 ц/га. За годы испытаний в полевых условиях наблюдалось очень слабое поражение церкоспорозом, среднее – мучнистой росой.

Семена гибрида Смена проращивали согласно ГОСТ 22617.2-94 в течение 4 суток для определения энергии прорастания и 10 суток – всхожести. Для семян использовали подложки из минеральной ваты. По мере подсыхания подложки увлажняли дистиллированной водой. Для проращивания и монохроматического облучения растений использовали макеты со встроенными точечными светодиодными источниками ультрафиолетовой области в 380 нм (СД УФ), синего света в 440 нм (СД СС), зеленого света в 525 нм (СД ЗС), красного света в 660 нм (СД КС) и дальнего красного света в 730 нм (СД ДКС). Измеренные параметры интенсивности по плотности потока фотонов на уровне семян на подложке из минеральной ваты составили для вариантов исследований при СД УФ, СД СС, СД ЗС, СД КС и СД ДКС: 0,367, 6,904, 1,683, 2,577 и 3,506 мкмоль/м²*с., соответственно. Режим инсоляции генерируемого света в экспериментах был непрерывным. Режим питания для ростков при проращивании семян растений был исключительно на резервных запасных веществах семян в течение всего эксперимента. Характеристики светодиодного освещения приведены в таблице согласно протоколам измерений на спектрометре PG 100 N компании UPReTek, Тайвань.

Таблица. Интенсивность светодиодного облучения по спектрам в эксперименте
Table. Intensity of LED irradiation by spectra in the experiment

Спектр	ppfd	pdf	pdf-uv*	pdf-fr*	pdf-b*	pdf-g*	pdf-r*
УФ (380 нм)	0,367	0,9506	0,4433	0,146	0,1067	0,127	0,1357
Синий (440 нм)	6,904	7,125	0,0302	0,194	6,523	0,213	0,1729
Зеленый (525 нм)	1,683	1,821	0,0159	1,683	0,1435	1,44	0,111
Красный (660 нм)	2,577	2,734	0,0176	2,577	0,087	0,135	2,358
Дальний красный (730 нм)	3,506	32,11	0,0435	28,77	0,171	0,182	3,156

*Uv – ультрафиолет, b – синий, g – зеленый, r – красный, fr – дальний красный, ppfd – плотность фотосинтетического фотонного потока (400-700 нм), мкмоль/м²·с, pdf – плотность фотонного потока (в области 300-800 нм), мкмоль/м²·с

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из важных факторов прорастания семян является наличие или отсутствие света в этот период. По литературным данным, механизмы воздействия света на прорастание семян носят комплексный, неоднозначный характер [21]. В большинстве ранних литературных источников указывалось в основном на неблагоприятное влияние света на прорастание семян, однако в дальнейшем было сделано заключение, что большинство семян нейтральны к присутствию или отсутствию света при прорастании, но некоторые из них положительно реагируют на действие света [22,23]. По современным данным, для прорастания семян некоторых видов растений свет необходим (например, таких видов, как *Nicotiana*, *Lythrum*, *Chloris*), для других культур необходима, наоборот, темнота, а свет резко задерживает их прорастание (фацелия, амарант, клоповник, персидская вероника, тыква и др. [21,22]).

У светочувствительных видов реакция прорастающих семян на свет регулируется фитохромной пигментной системой. Красный свет стимулирует прорастание семян светочувствительных видов, дальний красный – ингибирует. Стимулирующее влияние красного света нивелируется, если после него семена облучаются дальним красным, и, наоборот. Состояние фитохрома может регулировать синтез по крайней мере четырех типов фитогормонов (ауксины, гиббереллины, этилен, АБК), что, очевидно, и является причиной запуска соответствующих метаболических процессов [21,23]. При этом характерен низкий порог интенсивности света, вызывающий способность к прорастанию у светочувствительных видов. Так, для семян березы достаточно 1 лк, семян сосны – 5 лк, а дальнейшее увеличение интенсивности освещения не оказывает заметного влияния [22,25].

В действующих ГОСТах на методы проращивания семян оговариваются условия определения всхожести – свет или темнота. Семена свеклы столовой и кормовой согласно ГОСТ Т 12038-84 необходимо проращивать в темноте, т.е. предполагается,

что воздействие света снижает количество проросших семян данной культуры. В специальном ГОСТ 22617.2-94 на проращивание семян сахарной свеклы не уточняется прямо необходимость темноты при проращивании, однако проращивание проводят в термостате. Кроме того, свекла сахарная, столовая и кормовая относятся к одному ботаническому виду, что дает основания предполагать сходные требования к условиям выращивания.

Проведенный нами эксперимент показал, что при соблюдении условий ГОСТ (проращивание в темноте) энергия прорастания составила 54%, всхожесть – 86% для контрольного варианта (рис. 1-2). Облучение светодиодами с разной длиной волны по-разному влияло на прорастание семян свеклы сахарной. Так, воздействие монохроматического дальнего красного света (730 нм) с плотностью потока фотонов 32,11 мкмоль/м²·с значительно угнетало процесс прорастания семян. Снижение энергии прорастания составило 42,6%, всхожести – 45,3%, по сравнению с контролем – проращиванием в темноте. Эти данные согласуются с известными физиологам эффектом дальнего красного света на прорастание семян. Однако при освещении красным светом (660 нм) с плотностью потока фотонов 2,734 мкмоль/м²·с также вело к

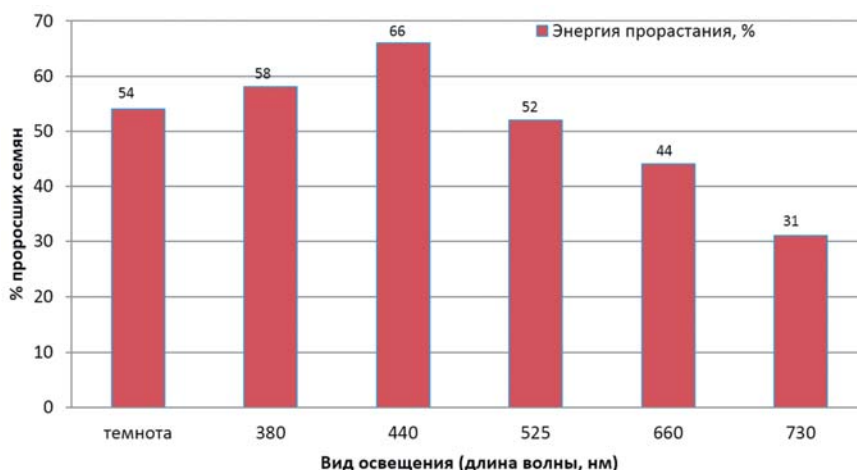


Рис. 1. Энергия прорастания семян свеклы сахарной в зависимости от вида освещения (НСР₀₅=1,4%)
Fig. 1. Germination energy of sugar beet seeds depending on the type of lighting (Isd₀₅=1,4%)

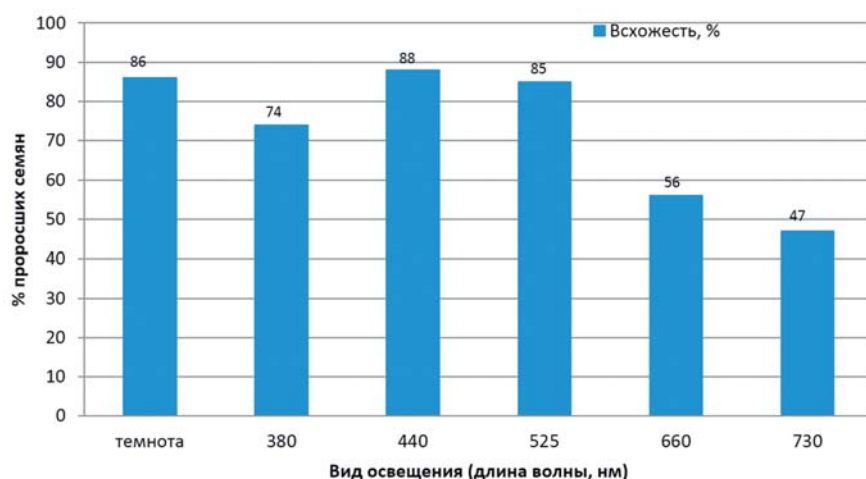


Рис. 2. Всхожесть семян свеклы сахарной в зависимости от вида освещения ($HCP_{05}=2\%$)
Fig. 2. Germination of sugar beet seeds depending on the type of lighting ($Isd_{05}=2\%$)

снижению посевных свойств семян относительно контроля. Показатели энергии прорастания снизились на 18,5%, а всхожести – на 34,9% относительно контроля.

В то же время воздействие монохроматического излучения в синей (440 нм) и зеленой (525 нм) областях при плотности потока фотонов 7,125 мкмоль/м²·с и 1,821 мкмоль/м²·с, соответственно, не приводит к снижению посевных свойств семян, и их различия по всхожести по сравнению с контролем статистически недостоверны. Энергия прорастания под влиянием синего света даже возрастала на 22,2% при сохранении показателя энергии прорастания для зеленого света (525 нм) относительно контроля. Вероятно, световые воздействия при этой длине волны способствуют стимуляции начальных физиологических процессов прорастания семян.

Воздействие УФ-А света (380 нм) приводило к повышению энергии прорастания на 7,4% по сравнению с темновым проращиванием. Однако всхожесть, наоборот, снижалась на 14%. Причины такого воздействия требуют изучения. Следует отметить, что увеличение энергии прорастания по сравнению с контролем наблюдалось и при облучении синим светом (440 нм), однако, в данном случае снижения всхожести семян отмечено не было.

Для более детального исследования влияния монохромного облучения на прорастание семян также проводились измерения высоты ростков (на 4, 6 и 10 сутки после посева) и надземной биомассы растений (на 10 сутки).

Динамика роста сеянцев представлена на рисунке 3. Сравнение ростков по высоте в темноте и при освещении осложняется тем, что без доступа света растения вытягиваются, приобретают светлую окраску, становятся этиолированными. Это наиболее заметно в третий срок наблюдения (на 10 сутки после посева семян). В данном случае высота ростков не может служить показателем нормального роста растений. Тем не менее, в варианте зеленого света высота ростков на 10 сутки приближалась к контролю, при этом ростки были хорошо развитые, не этиолированы, в отличие от контрольных. Хорошо развитые ростки, но несколько меньшей высо-

ты, формировались под синим и УФ-А светом. В начальный период прорастания (4 суток) ростки при освещении синим, зеленым и УФ-А светом превышали по высоте контрольный вариант. В промежуточный период наблюдений (на 6 сутки) растения в варианте зеленого света превосходили по высоте контроль, в вариантах синего и УФ-А света – на уровне контроля. Использование монохромного дальнего красного и красного освещения угнетает рост сеянцев во всех временных точках эксперимента (на 4, 6 и 10 сутки после посева семян). Отметим, что воздействие как красного, так и дальнего красного света, уменьшало энергию прорастания и всхожесть семян (рис. 1-2).

Наиболее информативны для оценки влияния монохроматического облучения при прорастании семян данные учета средней массы 100 ростков в конце периода проращивания – на 10 сутки после посева (рис. 4).

Данные эксперимента подтверждают, что воздействие дальнего красного и красного света угнетает рост растений на начальных этапах онтогенеза (10 суток от посева). Снижение массы 100 ростков составило по сравнению с контролем 21,8% для дальнего красного и 53,7% для красного света. Таким образом, проращивание под освещением с длинами волн 730 нм или 660 нм угнетает прорастание семян свеклы сахарной.

В то же время по сравнению с контролем (темнота) проращивание семян при зеленом и синем свете увеличивает массу ростков соответственно на 19,8% и 7,3%. Отметим, что при этих длинах волн не наблюдалось также уменьшения энергии прорастания и всхожести. Таким образом, монохроматический зеленый и синий свет благоприятно сказывались на прорастании семян и росте сеянцев сахарной свеклы. Под воздействием УФ-А освещения масса 100 ростков снижается, но не так значительно, как при красном и ДК свете (на 9,9%).

Таким образом, реакция семян и ростков свеклы сахарной на освещение монохроматическим светом зависит от длины волны. Это говорит об актуальности подбора вариантов спе-

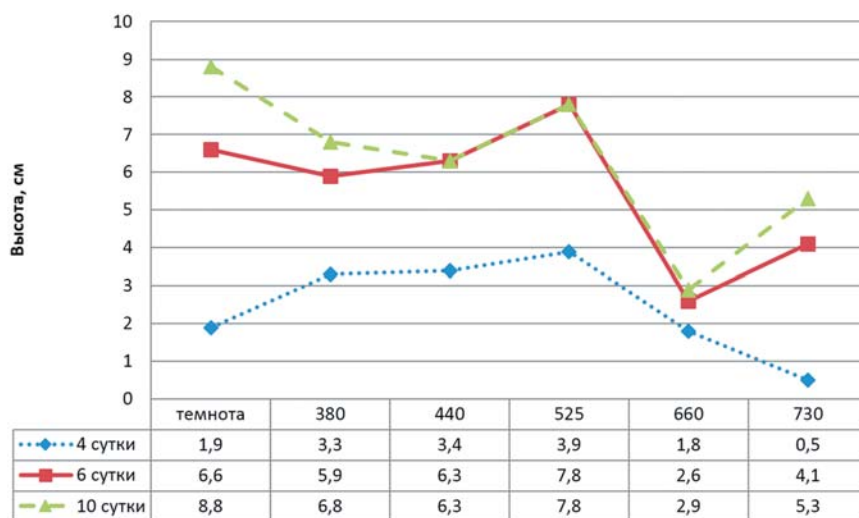


Рис. 3. Высота ростков свеклы сахарной в зависимости от вида освещения (на 10-е сутки $HCP_{05}=0,3$ см)
Fig. 3. Height of sugar beet sprouts depending on the type of lighting (on the 10th day $Isd_{05}=0.3$ cm)

Заключение

Экспериментально показано, что при проращивании семян (соплодий) свеклы сахарной под монохромным дальним красным светом энергия прорастания снижалась на 23%, всхожесть – на 39% по сравнению с контролем – темновым проращиванием. Масса 100 ростков уменьшалась на 21,8%, значительно уменьшалась длина ростков. Также отрицательные результаты получены при проращивании семян под красным светом (660 нм). В то же время установлена стимулирующая роль монохромного зеленого и синего света – увеличение массы ростков составило соответственно 19,8% и 7,3% при сохранении всхожести на уровне контроля – темнового проращивания. По экспериментальным данным, свекла сахарная относительно устойчива к монохромному УФ-А облучению.

Полученные данные могут быть использованы для изучения биологических особенностей свеклы сахарной, технологий предпосевной подготовки соплодий и при разработке систем освещения на разных этапах онтогенеза при выращивании в закрытых агробiotехносистемах.

Материалы представленной в статье работы были доложены и обсуждены на VIII международной научно-практической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки», Симферополь, 25-29 сентября 2023 г [27].

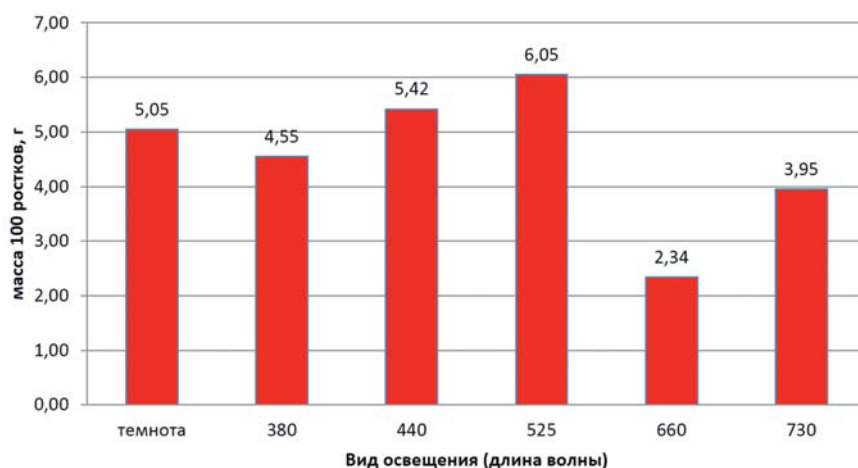


Рис. 4. Средняя масса 100 ростков свеклы сахарной на 10-е сутки проращивания в зависимости от вида освещения ($HCP_{05}=0,21$ г)
Fig. 4. The average weight of 100 sugar beet sprouts on the 10th day of g

специализированного освещения растений, т.е. вариантов освещения, в наибольшей степени раскрывающих потенциальные возможности растений, в частности, свеклы сахарной. Использование монохромного освещения – одна из наиболее существенных технологий такого управления. Положительный эффект светодиодного освещения волнами различного спектра на фотосинтетический аппарат подтверждено на многих наземных растениях [26]. Промышленное производство и использование светодиодов с разной длиной волны такую возможность дает.

Литература

- Драгавцев В.А. Новая регуляция у растений и необходимость создания селекционного фитотрона в РФ. *Журнал технической физики*. 2018;88(9):1331-1335. DOI 10.21883/JTF.2018.09.46416.26-18. EDN YWBPRR.
- Зеленков В.Н., Верник П.А. Создание замкнутых агробiotехносистем на базе цифровых технологий – новые возможности научного познания культур клеток и высших растений. *Актуальная биотехнология*. 2018;3(26):50-54. EDN ZASEKT.
- Landi M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S.I.. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA). Bioenergetics*. 2020;1861(2):148131. DOI: 10.1016/j.bbabi.2019.148131.
- Li-li Chen, Kai Zhang, Xiao-chen Gong, Hao-ying Wang, Yue-gao Hu. 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. *Journal of Integrative Agriculture*. 2020;19(1):108-119. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X)
- Frąszczak B., Kula-Maximenko M. The preferences of different cultivars of lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L.) for the spectral composition of light. *Agronomy*. 2021;11(6):1211. DOI: 10.3390/agronomy11061211.
- Stutte G.W., Edney S., Skerrett T. Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*. 2009;44(1):79–82. DOI:10.21273/HORTSCI.44.1.79.
- Bantis F., Ouzounis T., Radoglou K. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Sci. Hortic*. 2016;(198):277–283. DOI:10.1016/j.scienta.2015.11.014.
- Наконечная О.В., Холин А.С., Субботин Е.П., Бурковская Е.В., Хроленко Ю.А., Графицкая И.В., Орловская И.Ю., Бурдуковский М.Л., Михеева А.В., Кульчин Ю.Н. Влияние светодиодного освещения разного спектра на развитие салата листового (*Lactuca sativa*). *Известия РАН, серия биологическая*. 2023;(3):278–286. DOI 10.31857/S1026347022600406. EDN MIAMYY.
- Xiaoyan Zhang, Zhonghua Bian, Xingxing Yuan, Xin Chen, Chungui Lu. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;(99):203-216. DOI:10.1016/j.tifs.2020.02.031
- Мартirosyan Ю.Ц., Диловарова Т.А., Мартirosyan В.В., Креславский В.Д., Кособрухов А.А. Действие светодиодного облучения разного спектрального состава на фотосинтетический аппарат растений картофеля (*Solanum tuberosum* L.) в культуре *in vitro*. *Сельскохозяйственная биология*. 2016;51(5):680–687. <http://doi.org/10.15389/agrobiol.2016.5.680rus>. EDN WZJQJN.
- Wang J., Lu W., Tong Y., Yang Q. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*. 2016;(7):64–73. DOI:10.3389/fpls.2016.00250.
- Якушенкова Т.П. Биохимические особенности *Brassica oleracea* var. *sabellica*, *Ocimum basilicum*, *Petroselinum crispum* при выращивании на различных спектрах света. Сборник тезисов Всероссийской научной конференции с международным участием, Казань 19-21 сентября 2019. Казань: Изд-во Казанского университета. 2019. 495 с. DOI: 10.26907/978-5-00130-204-9-2019-495. EDN EMJVP.
- Шейн Е.В., Гончаров В.М. Агрофизика. 2-е издание, дополненное и переработанное. М.: "КДУ", "Добросвет", 2019. 184 с. ISBN 978-5-7913-1119-1. – DOI 10.31453/kdu.ru.91304.0090. EDN IJXETL.
- Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C., Gains G.D., Naikane J.H. Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment - A review of research at Kennedy Space Center. *Acta Horticulturae*. June 2006;711(711):111-119. DOI:10.17660/ActaHortic.2006.711.11.
- Мишанов А.П., Маркова А.Е., Ракутько С.А., Бровцин В.Н., Ракутько Е.Н. Влияние соотношения долей зеленого и красного излучения на биометрические показатели салата. *Сб. науч. трудов. ИАЭП*. 2015;(87):264–271.
- Rutao Z., Guangrong H., Lihong W., Qing Z., Xiaohua H.. Effects of elevated ultraviolet-B radiation on root growth and chemical signaling molecules in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;(17130):683-690. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.035
- Зеленков В.Н., Лапин А.А., Латушкин В.В., Карпачев В.В. Влияние ультрафиолетового облучения на биохимические свойства растений. *Бутлеровские сообщения*. 2020;63(8):134-140. DOI 10.37952/ROI-jbc-0120-63-8-134. EDN EGLQEH.
- Marcos E.V.A., Eloiny G.B., Rodrigo S.L.A. Physiological and sanitary quality of castor oil plant seeds due to ultraviolet-C radiation. *Industrial Crops and Products*. 2020;(137):9-15. DOI:10.1016/j.indcrop.2019.05.014.
- Dyshlyuk O., Babich A., Prosekov S., Ivanova T. Chaplygina. The effect

of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato. *Heliyon*. January 2020;6(1):e03288. DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e03288

20. Caldwell C.R., Britz S.J. Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of greenhouse-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars. *J. Food Compos. Anal.* 2006;19(6-7):637-644. DOI:10.1016/j.jfca.2005.12.016.

21. Попцов А.В., Некрасов В.И., Иванова И.А. Очерки по семеноведению. М.: Наука, 1981. 112 с.

22. Крокер В., Бартон Л. Физиология семян. М.: Наука, 1955. 399 с.

23. Леманн Е., Айхеле Ф. Физиология прорастания семян злаков. М., Л., 1936. 483 с.

24. Физиология и биохимия покоя и прорастания семян. М.: Наука, 1982. 495 с.

25. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесная промышленность, 1983. 464 с.

26. Blaszcak U.J., Abdel Aziz D., Gryko L. Influence of the spectral composition of LED lighting system on plants cultivation in a darkroom. Conference: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2017. August 2017. DOI:10.1117/12.2281023.

27. Зеленков В.Н., Латушкин В.В., Верник П.А., Иванова М.И. Проращивание семян сахарной свеклы в условиях низкоэнергетического монохромного облучения в области 380-730 нм. *Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки [Электронный ресурс] : материалы VIII международной научно-практической конференции, Симферополь, 25-29 сентября 2023 г.* Электрон. дан. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2023. С. 65-66. Электрон. версия. ISBN 978-5-907742-75-8. DOI 10.5281/zenodo.8268094. EDN XBENGX.

References

- Dragavtsev V.A. New regulation in plants and the need to create a breeding phytotron in the Russian Federation. *Journal of Technical Physics*. 2018;88(9):1331-1335. DOI 10.21883/JTF.2018.09.46416.26-18. EDN YWBPRR. (In Russ.)
- Zelenkov V.N., Vernik P.A. Creation of closed agrobiotechnological systems based on digital technologies – new opportunities for scientific knowledge of cell cultures and higher plants. *Current biotechnology*. 2018;3(26):50-54. EDN ZASEKT. (In Russ.)
- Landi M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S.I.. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA). Bioenergetics*. 2020;1861(2):148131. DOI: 10.1016/j.bbabi.2019.148131.
- Li-li Chen, Kai Zhang, Xiao-chen Gong, Hao-ying Wang, Yue-gao Hu. 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. *Journal of Integrative Agriculture*. 2020;19(1):108-119. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X)
- Frąszczak B., Kula-Maximenko M. The preferences of different cultivars of lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L.) for the spectral composition of light. *Agronomy*. 2021;11(6):1211. DOI: 10.3390/agronomy11061211.
- Stutte G.W., Edney S., Skerrett T. Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*. 2009;44(1):79-82. DOI:10.21273/HORTSCI.44.1.79.
- Bantis F., Ouzounis T., Radoglou K. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Sci. Hortic.* 2016;(198):277-283. DOI:10.1016/j.scienta.2015.11.014.
- Nakonechnaya O.V., Kholin A.S., Subbotin E.P., Burkovskaya E.V., Khrolenko Yu.A., Grafitskaya I.V., Orlovskaya I.Yu., Burdukovsky M.L., Mikheeva A.V., Kulchin Yu.N. The influence of led lights of different spectrum on the development of *Lactuca sativa*. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological series*. 2023;(3):278-286. DOI 10.31857/S1026347022600406. EDN MIAMVY. (In Russ.)
- Xiaoyan Zhang, Zhonghua Bian, Xingxing Yuan, Xin Chen, Chungui Lu. A

- review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;(99):203-216. DOI:10.1016/j.tifs.2020.02.031
10. Martirosyan Yu.Ts., Dilovarova T.A., Martirosyan V.V., Kreslavsky V.D., Kosobryukhov A.A. The effect of LED irradiation of different spectral composition on the photosynthetic apparatus of potato plants (*Solanum tuberosum* L.) in culture *in vitro*. *Agricultural Biology*. 2016;51(5):680-687. doi: <https://doi.org/10.15389/agrobology.2016.5.680rus>. EDN WZJQJN. (In Russ.)
11. Wang J., Lu W., Tong Y., Yang Q. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*. 2016;(7):64-73. DOI:10.3389/fpls.2016.00250.
12. Yakushenkova T.P. Biochemical features of *Brassica oleracea* var. *sabellica*, *Ocimum basilicum*, *Petroselinum crispum* when grown on different light spectra. Collection of abstracts of the All-Russian Scientific Conference with international participation, Kazan, September 19-21, 2019. Kazan: Publishing House of Kazan University. 2019. 485 p. DOI: 10.26907/978-5-00130-204-9-2019-495. EDN EMJVPA. (In Russ.)
13. Shein E.V., Goncharov V.M. Agrophysics. 2nd edition, supplemented and revised. M.: "KDU", "Dobrosvet", 2019. 184 p. ISBN 978-5-7913-1119-1. – DOI 10.31453/kdu.ru.91304.0090. EDN IJXETL. (In Russ.)
14. Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C., Gains G.D., Naikane J.H. Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment - A review of research at Kennedy Space Center. *Acta Horticulturae*. June 2006;711(711):111-119. DOI:10.17660/ActaHortic.2006.711.11.
15. Mishanov A.P., Markova A.E., Rakutko S.A., Brovtin V.N., Rakutko E.N. The effect of the ratio of green and red radiation on biometric indicators of lettuce. *Collection of scientific works. IAEP*. 2015;(87):264-271. (In Russ.)
16. Rutao Z., Guangrong H., Lihong W., Qing Z., Xiaohua H.. Effects of elevated ultraviolet-B radiation on root growth and chemical signaling molecules in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;(17130):683-690. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.035
17. Zelenkov V.N., Lapin A.A., Latushkin V.V., Karpachev V.V. Effect of ultraviolet radiation on plant biochemical properties. *Butlerov Communications*. 2020;63(8):134-140. DOI 10.37952/ROI-jbc-01/20-63-8-134. EDN EGLQEH. (In Russ.)
18. Marcos E.V.A., Eloiny G.B., Rodrigo S.L.A. Physiological and sanitary quality of castor oil plant seeds due to ultraviolet-C radiation. *Industrial Crops and Products*. 2020;(137):9-15. DOI:10.1016/j.indcrop.2019.05.014.
19. Dyshlyuk O., Babich A., Prosekov S., Ivanova T. Chaplygina. The effect of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato. *Heliyon*. January 2020;6(1):e03288. DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e03288
20. Caldwell C.R., Britz S.J. Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of greenhouse-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars. *J. Food Compos. Anal.* 2006;19(6-7):637-644. DOI:10.1016/j.jfca.2005.12.016.
21. Poptsov A.V., Nekrasov V.I., Ivanova I.A. Essays on seed science. M.: Nauka, 1981. 112 p. (In Russ.)
22. Crocker V., Barton L. Physiology of seeds. M.: Nauka, 1955. 399 p. (In Russ.)
23. Lehmann E., Eichele F. Physiology of germination of grain seeds. M., L., 1936. 483 p. (In Russ.)
24. Physiology and biochemistry of rest and germination of seeds. Moscow: Nauka, 1982. 495 p. (In Russ.)
25. Kramer P.D., Kozlovsky T.T. Physiology of woody plants. M.: Forest industry, 1983. 464 p. (In Russ.)
27. Zelenkov V.N., Latushkin V.V., Vernik P.A., Ivanova M.I. Germination of sugar beet seeds under low-energy monochrome irradiation in the range of 380-730 nm. Current State, Problems and Prospects for the Development of Agrarian Science [Electronic resource]: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Simferopol, 25-29 September 2023. Ed. by V. S. Pashtetsky. Electron. dan. Simferopol : IT "ARIAL", 2023. P/65-66. Electron. Version. ISBN 978-5-907742-75-8. DOI 10.5281/zenodo.8268094. EDN XBENGX. (In Russ.)

Об авторах:

Валерий Николаевич Зеленков – кандидат хим. наук, доктор с.-х. наук, проф., гл. научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5481-2723>, SPIN-код: 5684-6210, автор переписки, zelenkov-raen@mail.ru

Вячеслав Васильевич Латушкин – кандидат с.-х. наук, вед. научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1406-8965>, slavalat@yandex.ru

Сергей Викторович Гаврилов – начальник отдела телеметрии, <https://orcid.org/0000-0003-2824-9302>, gavrilovr@mail.ru

Петр Аркадьевич Верник – директор института, <https://orcid.org/0000-0001-5850-7654>, petr@zolshar.ru

Мария Ивановна Иванова – доктор с.-х. наук, проф. РАН, гл. научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>, SPIN-код: 1961-9188, ivanova_170@mail.ru

About the Authors:

Valery N. Zelenkov – Dr. Sci. (Agriculture), Prof., Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5481-2723>, Correspondence Author, zelenkov-raen@mail.ru

Vyacheslav V. Latushkin – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1406-8965>, slavalat@yandex.ru

Sergey V. Gavrilov – Head of the Telemetry Department, <https://orcid.org/0000-0003-2824-9302>, gavrilovr@mail.ru

Petr A. Vernik – Director, <https://orcid.org/0000-0001-5850-7654>, petr@zolshar.ru

Maria I. Ivanova – Dr. Sci. (Agriculture), Prof., Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>, ivanova_170@mail.ru