

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-6-129-135>
УДК 633.63:581.144.043

П.А. Верник¹, В.Н. Зеленков^{2,3*},
В.В. Латушкин¹, А.А. Кособрюхов⁴,
В.Б. Новиков¹, Л.Н. Путилина⁵,
М.И. Иванова⁵, С.В. Гаврилов¹

¹ Автономная некоммерческая организация

«Институт стратегий развития»

107031, Россия, г. Москва,

ул. Петровка, д. 15/13, стр. 5

² Всероссийский научно-исследовательский инсти-

тут овощеводства – филиал Федерального госу-

дарственного бюджетного научного

учреждения «Федеральный научный центр

овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО)

140153, Россия, Московская область, Раменский

район, д. Верея, стр. 500

³ Федеральное государственное бюджетное научное

учреждение «Всероссийский

научно-исследовательский институт

лекарственных и ароматических растений»

117216, Россия, г. Москва, ул. Грина, д. 7

⁴ Федеральное государственное бюджетное научное

учреждение Институт фундаментальных проблем

биологии «Федеральный

исследовательский центр «Пушкинский научный

центр биологических исследований

Российской академии наук»

142290, Россия, Московская область,

г. Пушкино, Проспект Науки, д. 3.

⁵ Федеральное государственное бюджетное научное

учреждение «Всероссийский

научно-исследовательский институт

сахарной свеклы имени А.Л. Мазлумова»

396030, Россия, Воронежская область, Рамонский

район, п. ОПХ ВНИИСС, д. 86

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют

об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Все авторы участвовали

в анализе материалов, написании текста статьи и

формировании выводов.

Для цитирования: Верник П.А., Зеленков

В.Н., Латушкин В.В., Кособрюхов А.А., Новиков В.Б.,

Путилина Л.Н., Иванова М.И., Гаврилов С.В. Влияние

увеличения доли дальнего красного света в полно-

спектральном светодиодном облучении на рост и раз-

витие растений сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L. ssp.

vulgaris var. *saccharifera* Alef.) в закрытых агробиотехно-

системах. *Овощи России*. 2023;(6):129-135.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-6-129-135>

Поступила в редакцию: 28.08.2023

Принята к печати: 19.10.2023

Опубликована: 04.12.2023

Petr A. Vernik¹, Valery N. Zelenkov^{2,3*},

Vyacheslav V. Latushkin¹,

Anatoly A. Kosobryukhov⁴,

Vladimir B. Novikov¹, Lyudmila N. Putilina⁵,

Maria I. Ivanova⁵, Sergey V. Gavrilo¹

¹Independent NPO Institute for Socio-Economic

Strategies and Development Technologies (Institute for

Development Strategies)

15/13, bldg. 5, Petrovka str.,

Moscow, 107031, Russia

²All-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

³All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal

and Aromatic Plants.

ароматических растений»

7, Grina str., Moscow, 117216

⁴Institute of Basic Biological Problems

of Russian Academy of Sciences (IBBP RAS)

3, Prospekt Nauki, Pushchino,

Moscow region, Russia, 142290

⁵The A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of

Sugar Beet and Sugar

86, VNISS, Ramonsky district,

Voronezh region, Russia, 396030

*Corresponding Author: zelenkov-raen@mail.ru

Conflict of interest. The authors declare that there are

no conflicts of interest.

Authors' Contribution. All authors participated in the

analysis of materials, writing the text of the article and

forming conclusions.

For citation: Vernik P.A., Zelenkov V.N., Latushkin V.V.,

Kosobryukhov A.A., Novikov V.B., Putilina L.N., Ivanova

M.I., Gavrilo S.V. The effect of increasing the propor-

tion 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 Russ.)

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-6-129-135>

Received: 28.08.2023

Accepted for publication: 19.10.2023

Published: 04.12.2023

Влияние увеличения доли даль- ней красной области в полноспектральном светодиодном облучении на рост и развитие растений сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L. ssp. *vul-* *garis* var. *saccharifera* Alef.) в закрытых агробиотехносистемах



Резюме

Актуальность и методология. С целью определения влияния увеличения доли дальнего красного света (различного соотношения красного и дальнего красного света) в общем спектре полихромного облучения на показатели роста растения сахарной свеклы гибрида Смена выращивали в течение 82 суток при светодиодном освещении в условиях регулируемого климата в цифровом устройстве «Синерготрон» модели ИСР 2.01 с двукратным увеличением доли дальнего красного света по сравнению с контролем.

Результаты. Увеличение доли дальнего красного света приводило к повышению удельной массы листьев при меньшей их площади в начальный период роста растений, более высоким значениям квантового выхода фотосинтеза, скорости электронного транспорта и снижению потерь энергии преимущественно в тепло. Биометрические показатели растений изменялись в зависимости от периода онтогенеза. В начальный период превалировала биомасса надземной части, в последующий – биомасса корнеплодов. В опытном варианте накопление биомассы в надземной части растений в начальный период эксперимента оказалась меньше, чем в контроле, и только в конце эксперимента отмечено превышение общей биомассы в опытном варианте на 12,2%. Происходило повышение накопления биомассы корнеплода по сравнению с контролем на 38,7%. Преобладающую часть надземной биомассы сахарной свеклы составляли листовые пластинки, доля черешков значительно меньше и практически не зависела от состава света. В конце периода выращивания содержание сухих веществ в корнеплодах возрастало на 2,44% по сравнению с контролем, сахаристость – на 0,65%. Полученные данные могут быть использованы при разработке технологии искусственного освещения сахарной свеклы при выращивании в закрытых агробиотехносистемах с целью повышения урожайности и сахаристости корнеплодов.

Ключевые слова: синерготрон, закрытая агробиотехносистема, свекла сахарная, дальний красный свет, спектральный состав, флуоресценция хлорофилла, биометрические показатели

The effect of increasing the proportion of the far red region in full-spectrum LED irradiation on the growth and develop- ment of sugar beet plants (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.) in closed agrobiotechnological systems

Abstract

Relevance and methodology. In order to determine the effect of increasing the proportion of far red light (different ratio of red and far red light) in the total spectrum of polychrome irradiation on the growth rates of sugar beet plants of the Smena hybrid, they were grown for 82 days under LED lighting under controlled climate conditions in a Synergotron digital device of the ISR 2.01 model with a twofold increase in the proportion of far red light compared to control.

Results. An increase in the proportion of far red light led to an increase in the specific weight of leaves with a smaller area of leaves in the initial period of plant growth, higher values of the quantum yield of photosynthesis, the rate of electron transport, and a decrease in energy losses mainly to heat. The biometric indicators of plants changed depending on the period of ontogeny. In the initial period, the biomass of the aerial part prevailed, in the subsequent period, the biomass of root crops. In the experimental variant, the accumulation of biomass in the aerial parts of plants in the initial period of the experiment turned out to be less than in the control, and only at the end of the experiment was an excess of the total biomass in the experimental variant by 12.2%. There was an increase in the accumulation of root biomass compared to the control by 38.7%. The predominant part of the aboveground biomass of sugar beet was made up of leaf blades, the proportion of petioles was much less and practically did not depend on the composition of the light. At the end of the growing period, the dry matter content in root crops increased by 2.44% compared to the control, sugar content – by 0.65%. The data obtained can be used in the development of technology for artificial lighting of sugar beets when grown in closed agrobiotechnosystems in order to increase the yield and sugar content of root crops.

Keywords: synergotron, closed agrobiotechnosystem, sugar beet, far red radiation, spectral composition, chlorophyll fluorescence, biometric indicators

Введение

Повышение эффективности выращивания растений в светокультуре во многом связано с внедрением технологий, включающих создание оптимального светового режима. Использование светодиодных облучателей (СД) позволяет резко сократить энергозатраты, подобрать наиболее благоприятный для роста и развития растений спектральный состав облучения. В этой связи не удивительно значительное количество работ, направленных на изучение роста и развития растений, активность фотосинтетического аппарата и ряда метаболических процессов растений при различном соотношении основных спектральных диапазонов [1,2].

Большинство растений поглощают свет в сине-фиолетовой области (от 380 до 490 нм) и в оранжево-красной области (от 595 до 710 нм), но пропускают или отражают свет в дальнем красном (ДКС) диапазоне (от 700 до 800 нм). Таким образом, свет, отраженный от надземной части растений, имеет пониженное отношение красного (КС) к дальнему красному (ДКС) свету (КС/ДКС). Например, отношение КС/ДКС дневного света составляет около 1,19 по сравнению с 0,13 внутри полога листьев растения плюща (*Hedera spp.*) [3]. Растения развили способность чувствовать и реагировать на изменения качества света с использованием семейства фоторецепторов, в частности, криптохромов и фитохромов, которые действуют как молекулярные переключатели в ответ на сине-фиолетовый свет и соотношение КС/ДКС, соответственно [4]. Спектр солнечного излучения представляет собой смесь ультрафиолетовой радиации и фотосинтетически активного излучения, света дальнего красного и ближнего инфракрасного диапазонов от 280 до 1100 нм [5]. Световая энергия оказывает влияние на рост и развитие растений, активность многих метаболических процессов. Облучение растений светом с низким соотношением КС/ДКС приводит к увеличению апикального доминирования, что является одной из наиболее распространенных ответных реакций, так как способствует более быстрому образованию листьев и прохождению фаз онтогенеза [6]. На уровне листьев происходит увеличение длины черешка и листа, уменьшение массы и площади листа, содержание хлорофилла и соотношение хлорофилла а/б [7]. Наряду с влиянием дальнего красного света на морфологию и развитие растений, имеет место изменение активности фотосинтетического аппарата. Изменение соотношения КС и ДКС может привести к более высокой скорости ассимиляции углерода и роста листовой поверхности растений [8,9]. В настоящее время появляется все больше работ по изучению действия светодиодного облучения с измененным спектральным составом в области КС и ДКС на растения, активность фотосинтетического аппарата [10-12].

Вместе с тем, исследования по изучению красной – дальней красной области спектра на растения продолжают активно проводиться, поскольку во многом остается невыясненным действие различного соотношения КС/ДКС при различных интенсивностях облучения, а также необходимость учета видовых особенностей растений.

Целью данного исследования явилась оценка влияния увеличения доли ДКС (различного соотношения

КС/ДКС) в спектре полихромного облучения на ростовые показатели и активность фотосинтетического аппарата в онтогенезе растений сахарной свеклы при их выращивании в контролируемых условиях.

Объект и методы исследования

Объект и условия выращивания растений

Объектом исследований служили растения свеклы сахарной (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *saccharifera* Alef.) гибрида Смена. Растения выращивали в синерготроне модели ИСП 2.01 конструкции АНО «Институт стратегий развития» (г. Москва) при облучении растений свеклы светом разного состава: полихромное (контроль) и полихромное с увеличенной долей в дальнем красном диапазоне. Фотопериод составлял 18 часов, температура воздуха день/ночь 25/22°C при относительной влажности 70-80%. Спектры облучения определяли на спектрометре PG 100 N компании UPRtek, Тайвань. Растения выращивали гидропонным методом на минераловатном субстрате. В лотках размером 1000x540 мм помещалось 28 растений. В онтогенезе, по срокам определения, отбирали по 4 растения из каждого варианта.

Устройство для выращивания растений

Синерготрон – цифровое устройство для культивирования биологических объектов на основе программно-управляемой внутренней среды, облачной обработки информации и разработанного языка описания с обратной связью по параметрам влажности, состава культивационных сред, температуры, освещения, акустических воздействий, газового состава, движения воздуха и других [13]. В устройстве использовали разработанные АНО «Институт стратегий развития» (г. Москва) светодиодные светильники со светодиодами компании Cree (США) с диапазоном излучения в области от 365 до 1980 нм, т.е. от ультрафиолетового до инфракрасного излучения. Потребляемая единичная мощность от 300 до 1300 Вт. Мощность облучения в области ФАР на расстоянии 100 мм от светильников для 300-ваттного облучателя достигает 1900 мкмоль/м²·с, для 1300-ваттного 3600 мкмоль/м²·с. Светильники имеют программное управление 9-ю спектральными линейками, как по силе излучения определенного светового спектра, так и по их комбинированию в определенную световую гамму. В устройстве реализована возможность проведения испытаний индивидуально по 8 лоткам в рабочей секции с различной интенсивностью облучения, спектром, пульсацией. КПД светодиодного светильника составляет 36%.

В настоящем эксперименте, в соответствии с целью и задачами исследований, светильники запрограммированы на светодиодное облучение растений свеклы сахарной светом разного состава: полихромное (контроль) и полихромное с увеличенной долей в ДК диапазоне.

В экспериментах использовали комбинированный субстрат: минераловатные маты толщиной 70 мм, однако в точках посева семян вырезали отверстия диаметром 70 мм и глубиной 60 мм и заполняли подготовленным кокосовым субстратом. Посев проводили по 3 соплодия в гнездо, после появления всходов оставляли одно наиболее развитое растение. Схема посева

135x150 мм. Полив проводили гидропонным питательным раствором следующего состава (в мг/л): N-NO₃ – 140; N-NH₄ – 5; P – 41; K – 275; Ca – 100; Mg – 24; S – 30; Fe – 0,94; Mn – 0,14; B – 0,16; Cu – 0,03; Zn – 0,13; Mo – 0,03; pH 5,5-6,0; EC 1,5-2.

Определение ростовых показателей и накопления сахаров

В период роста растений, в динамике, определяли содержание сухого вещества в корнеплодах и надземной части (листьях) на анализаторе влажности (влажнере) MX-50 (A&D Company, Япония) путем высушивания образцов при 105°C до постоянной массы.

В период вегетации в динамике (на 41, 50, 56, 63, 70, 77 и 82 день после посева семян) растения взвешивали для определения сырой биомассы растения в целом (в граммах) и его отдельных органов (корнеплодов, листьев, надземной биомассы в целом). Также в динамике определяли среднюю площадь листьев в расчете на одно растение (см² /растение) и удельную массу листовой пластинки (г/см²).

Определение сахаристости корнеплодов проводилось во ВНИИ сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова способом холодного водного диспергирования в соответствии с «Инструкцией по химико-техническому контролю и учету сахарного производства» (Киев, ВНИИСП, 1989) и ГОСТ Р 53036-2008 «Свекла сахарная. Методы испытаний». Определение проводили у растений в возрасте 82 суток от посева семян, т.е. при завершении эксперимента. Одновременно определяли содержание сухого вещества в корнеплодах по стандартной методике.

Измерение параметров переменной флуоресценции.

С помощью метода переменной флуоресценции, с использованием прибора мини-ПАМ-Junior (PAM-Junior, Heinz Walz, Germany), определяли активность фотосистемы 2 (ФС2). Листья растений экспонировали в темноте в течение 15 мин., затем освещали их вспышками света [14].

Определяли: F_v/F_m – показатель функционального состояния ФС2, где F_v – фотоиндуцированные изменения флуоресценции; $Y(II)$ – эффективный квантовый выход ФС 2 (при интенсивности измерения флуоресценции); F_m – максимальная флуоресценция, NPQ –

нефотохимическое тушение флуоресценции (NPQ), оценивает часть энергии, которая используется растением для нефотохимических реакций; ETR – относительная скорость транспорта электронов, косвенный показатель скорости фотосинтеза.

Статистическая обработка результатов опытов

Эксперименты выполняли в 4-кратной аналитической и 3-кратной биологической повторности. Общая закономерность не изменялась по вариантам опыта, поэтому результаты приведены по данным одной биологической повторности. Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ Excel. На рисунках приведены средние арифметические значения (M) со стандартной ошибкой ($\pm$ SEM). Достоверность различий определяли по t-критерию Стьюдента при P=0,95.

Результаты исследований

На рис. 1 приведены спектральные характеристики светодиодных облучателей при выращивании растений в камерах синерготрона.

Освещение полихромное (полноспектрное). Однако, в связи с целью исследований основное внимание при разработке схемы освещения уделяли соотношению и интенсивности красного и дальнего красного света. В результате в опытном варианте реализовано почти двукратное повышение отношения FR/Red (0,387) по сравнению с контролем (0,197). В опытном варианте (рис. 1B) интенсивность света в дальней красной области составляла 186,3 мкмоль/м²·с. В контроле – 75,1 мкмоль/м²·с (рис. 1A). Интенсивность света в области красного света соответственно 481,7 и 381 мкмоль/м²·с.

Из-за конструктивных особенностей светодиодов абсолютно точное выравнивание интенсивностей облучения и спектральных линеек в опытном и контрольном вариантах практически невозможно. Фактическая интенсивность по всем спектральным линиям в опыте и контроле составляла в контроле 955,1, в опыте – близкая величина 905,5 мкмоль/м²·с. Интенсивности облучения в других областях спектра (синем, зеленом, ультрафиолетовом) по вариантам различается в значительно меньшей степени, чем вариативность соотношения К/ДК спектров, что позволяет получать сопоставимые данные и выделить влияние именно ДК диапазона (табл. 1).

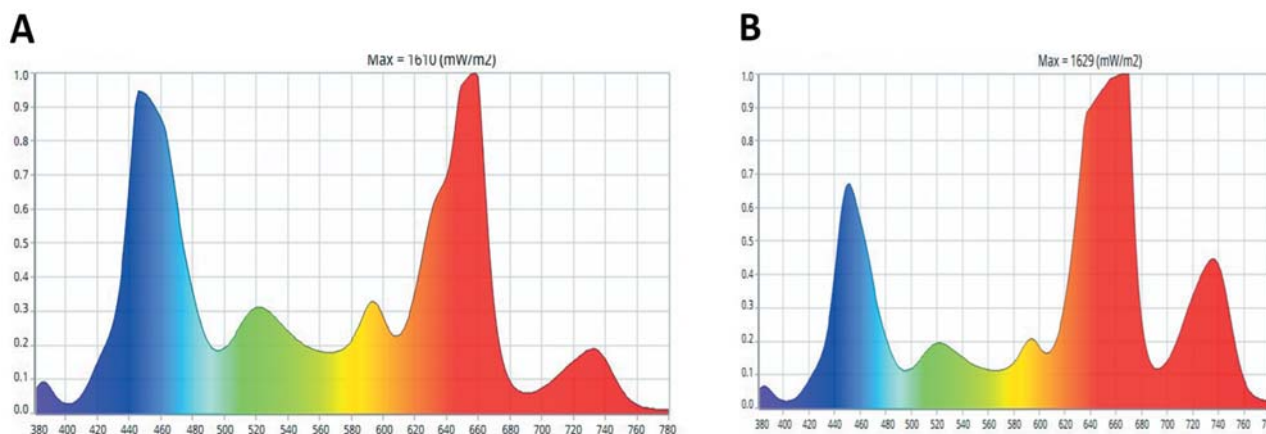


Рис. 1. Спектральные характеристики светодиодных облучателей при выращивании растений в камерах синерготрона
Fig. 1. Spectral characteristics of LED irradiators when growing plants in synergotron chambers

Таблица 1. Анализ световых режимов выращивания сахарной свеклы (данные спектров) в камере синерготрона ИСП 2.01
Table 1. Analysis of light modes of sugar beet cultivation (spectra data) in the IPS 2.01 Synergotron Camera

Вариант	Интенсивность освещения по видам спектра, мкмоль/м ² ·с и соотношение спектров						
	PPFD*	PFD*	UV	Red	Far red	UV/PPFD	FR/ Red
Контроль	824,5	905,5	6,8	381,0	75,1	0,0082	0,197
Опыт (ДК)	765,3	955,1	5,0	481,7	186,3	0,0065	0,387
Вариант	PPFD*	PFD*	Blue	Green	Red	B/R B /G +R	G/R G/B+R
Контроль	824,5	905,5	263,5	183,4	381,0	0,69 0,47	0,48 0,28
Опыт (ДК)	765,3	955,1	168,9	117,0	481,7	0,35 0,28	0,24 0,18

* UV ультрафиолет, Blue –синий, Green –зеленый, Red –красный, Far red –дальний красный, PPFD – фотосинтетически активная радиация, PFD радиация, включает ультрафиолет + дальний красный + фотосинтетически активная радиация.

Изменение соотношения ДКС/КС в спектре облучения растений приводило к изменению морфологических показателей растений с течением времени (Рис. 2). Так, повышение ДКС в спектре облучения приводило к снижению скорости нарастания площади листовой поверхности у растений по сравнению с контролем в течение большего периода вегетации. Только после 70 суток после посева семян наблюдалось снижение за счет оттока ассимилянтов в корнеплоды и частичного отмирания нижних листьев. В опыте с повышенным содержанием света в ДК области облучения нарастание площади листьев происходило в течение более длительного времени (до 77 суток после посева семян).

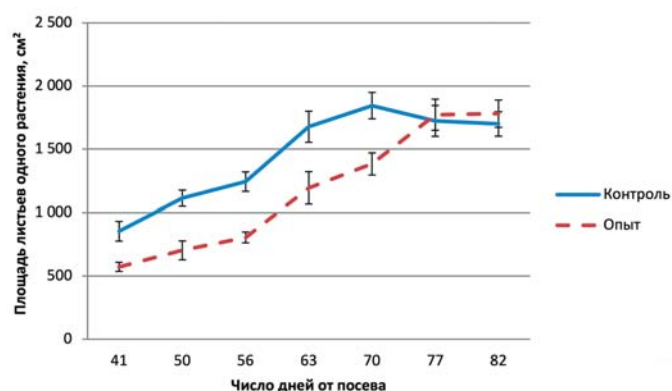


Рис. 2. Динамика развития листового аппарата сахарной свеклы в зависимости от доли ДКС в спектре освещения
Fig. 2. Dynamics of the development of sugar beet leaf apparatus depending on the share of far red light range in the spectrum of light

Следует отметить, что при меньшей площади листьев растений, выращиваемых при относительном повышении доли ДКС в спектре облучения, удельная масса листьев была выше по сравнению с контролем (табл. 2). Разница сохранялась на протяжении всего периода выращивания растений.

Наряду с изменениями площади листовой поверхности и толщины листьев можно было ожидать, что растения в условиях различного спектрального состава облучения формируют фотосинтетический аппарат, различающийся по своей активности. Определение активности световой стадии фотосинтеза показало, что повышение доли дальнего красного света в спектре облучения приводит к повышению реального квантового выхода фотосинтеза $\Psi(II)$ и скорости электронного транспорта (ETR), а также к снижению нефотосинтетического тушения флуоресценции NPQ (рис. 3).

Более эффективное использование световой энергии фотосинтетическим аппаратом у растений в опытном варианте (при повышенном отношении ДКС/КС) вместе с тем не реализуется в полной мере растениями, поскольку решающим фактором в накоплении биомассы растениями является увеличение площади листовой поверхности (рис. 2). В опытном варианте накопление биомассы в надземной части растений в начальный период проведения эксперимента оказалась меньше, чем в контроле (рис. 4).

Только в конце периода выращивания, на 77-82 сутки после посева семян, отмечено большее накопление биомассы в надземной части растений в опыте по сравнению с контролем (на 12,2%). В этот период происходило также активное накопление биомассы в корнеплодах (рис. 5). Если в начальный период роста

Таблица 2. Удельная масса листовой пластинки в зависимости от режимов освещения, г/см²
Table 2. The specific mass of the leaf blade depending on the lighting modes, g/cm²

Вариант	Сутки после посева семян						
	41	50	56	63	70	77	82
Контроль	0,0553±0,0038	0,0600±0,0042	0,0611±0,0051	0,0664±0,0044	0,0672±0,0043	0,0671±0,0048	0,0679±0,0029
Опыт (ДКС)	0,0689±0,0037	0,0756±0,0051	0,0761±0,0072	0,0798±0,0057	0,0760±0,0034	0,0748±0,0059	0,0751±0,0032

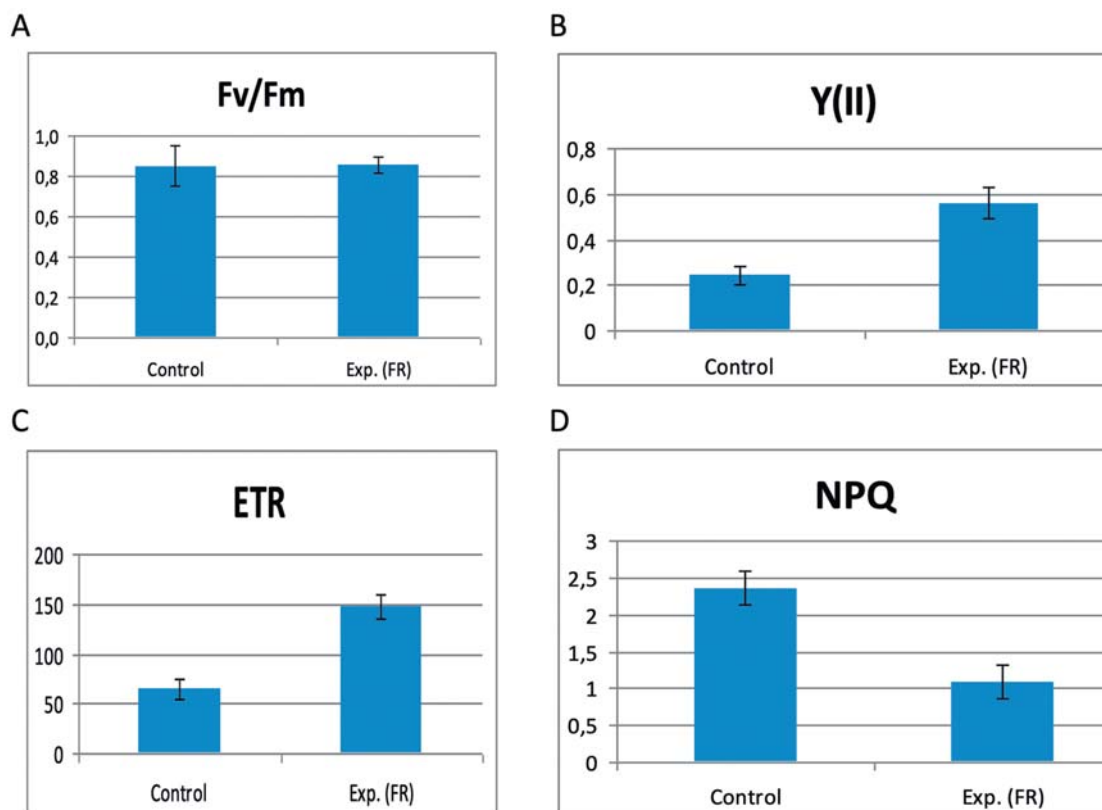


Рис. 3. Параметры переменной флуоресценции растений сахарной свеклы, выращенной в условиях синерготрона ИСП 2.01 *Fv/Fm* максимальный квантовый выход, *Y(II)* реальный квантовый выход фотосинтеза, *NPQ* – нефотохимическое тушение, *ETR* – скорость электронного транспорта

Fig. 3. Parameters of the variable fluorescence of sugar beet plants grown in the conditions of synergotron IPR 2.01 *Fv/Fm* maximum quantum output, *Y(II)* real quantum output of photosynthesis, *NPQ* – non-photochemical quenching, *ETR* – electronic vehicle

соотношение КС/ДКС незначительно влияло на накопление биомассы в корнеплодах сахарной свеклы, то, начиная с 70-х суток после посева, увеличение доли ДКС приводило к существенному (на 38,7%) росту биомассы корнеплода по сравнению с контролем. Таким образом, параллельное определение нарастания сырой массы корнеплодов и надземной части растений сахарной свеклы (рис. 4–5) показало, что не наблюдается прямой корреляции между этими показателями во вторую половину эксперимента (после 65–70 суток). Вероятно, это связано с оттоком части пластических веществ из листьев в корнеплоды.

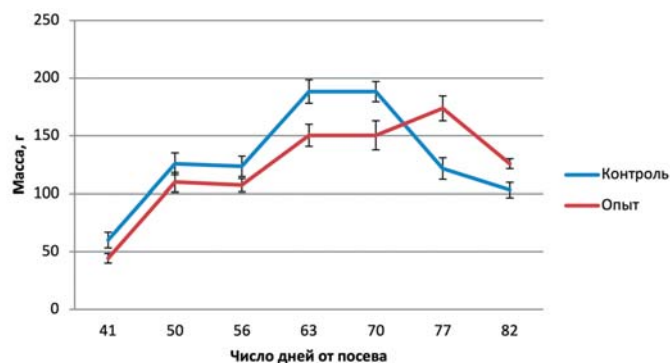


Рис. 4. Динамика накопления надземной биомассы сахарной свеклы в зависимости от светового режима выращивания растений

Fig. 4. Dynamics of accumulation of above-ground biomass of sugar beet plants depending on the lighting

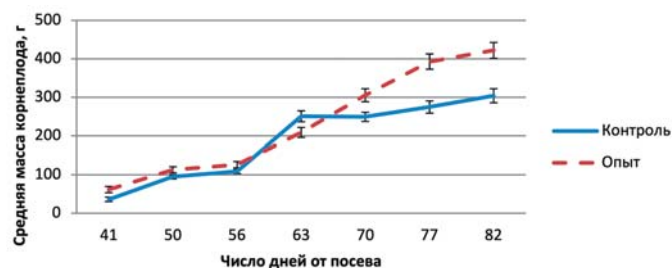


Рис. 5. Динамика накопления биомассы корнеплодов сахарной свеклы в зависимости от освещения

Fig. 5. The dynamics of the accumulation of biomass of root crops of sugar beets depending on the lighting

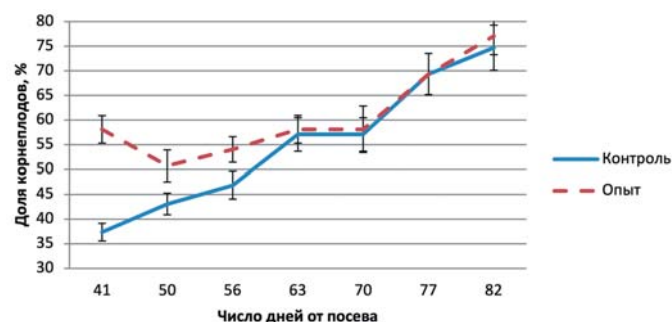


Рис. 6. Доля корнеплодов (подземной части) в общей биомассе растения сахарной свеклы в зависимости от освещения

Fig. 6. Proportion of root crops (underground) in the general biomass plant of sugar beets depending on the lighting

Доля корнеплодов в общей биомассе растений на начальных сроках их образования была выше по сравнению с контролем при увеличении доли КС, однако затем разница практически исчезала (рис. 6).

В онтогенезе растений происходило снижение доли листьев (надземной части растения) и увеличения доли корнеплодов - подземной части вследствие оттока ассимилянтов в корнеплоды (рис. 7).

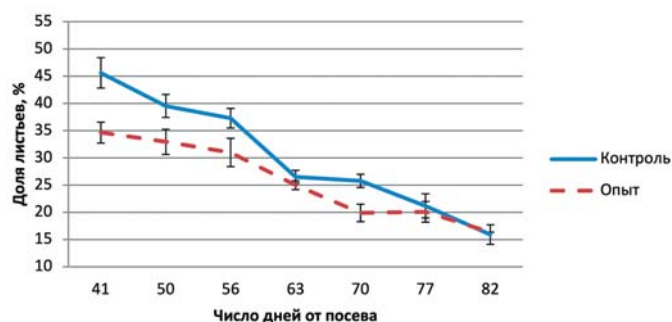


Рис. 7. Доля листьев (надземной части) в общей биомассе растения сахарной свеклы в зависимости от светового режима выращивания растений
Fig. 7. Proportion of leaf crops (above-ground) in the general biomass plant of sugar beets depending on the lighting

Увеличение доли дальнего красного света в спектре облучения растений приводило к изменению накопления сухого вещества в корнеплодах сахарной свеклы. В конце периода выращивания, на 77 сутки содержание сухого вещества повышалась на 1,9% по сравнению с контролем (рис. 8). Положительное влияние повышение доли дальнего красного света в спектре облучения на накопление сухого вещества

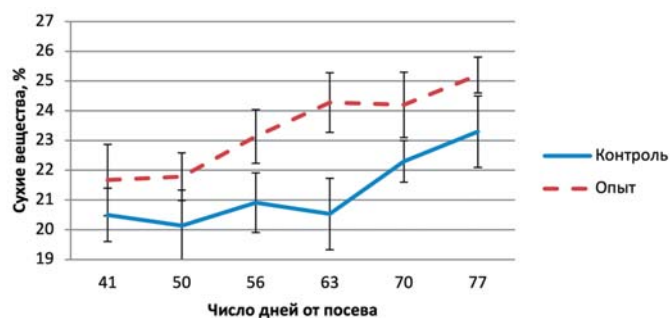


Рис. 8. Динамика накопления сухих веществ в корнеплодах сахарной свеклы в зависимости от светового режима выращивания растений
Fig. 8. Dynamics of accumulation of dry substances in the leaves (overhead biomass) of sugar beets depending on the lighting

проявлялось в течение всего периода эксперимента, начиная с момента образования и начального роста корнеплода.

Анализ корнеплодов в конце периода эксперимента (на 82 сутки после посева семян) показал увеличение накопления сухого вещества на 2,44% (таблица 3) в опытном варианте, при увеличении сахаристости на 0,65%, по сравнению с контролем. Различия статистически достоверны ($P=0,95$).

Таблица 3. Сахаристость и содержание сухих веществ в корнеплодах сахарной свеклы на 82 день после появления всходов в зависимости от освещения
Table 3. Sugar content and dry matter content in the root crops of sugar beets by 82 days after the appearance of shoots, depending on the lighting

Вариант	Содержание сухого вещества в корнеплодах, %	Сахаристость корнеплодов, %
Контроль	21,06±0,09	14,65 ±0,06
Опыт	23,05±0,08	15,30 ±0,08

Общий вид растений, выращиваемых в камере синерготрона ИСР 2.01. при облучении светом с различным соотношением КС/ДКС, приведен на рисунке 9.



Рис. 9. Фото образцов свеклы сахарной на 82 сутки эксперимента в камере синерготрона ИСР 2.01. Слева — контрольный образец, справа — опытный образец
Fig. 9. Photos of the beet samples on 82 days of experiment in Synergotron Camera IPR 2.01. On the left — a control sample, on the right — tested sample

Результаты исследований в камере синерготрона модели ИСР 2.01 показывают необходимость повышения доли ДК участка в спектре облучения растений сахарной свеклы для регулирования роста и развития, повышения активности фотосинтетического аппарата. Более низкие значения накопления биомассы растениями в опытном варианте в начале и середине онтогенеза связаны с медленным нарастанием площади листовой поверхности. При этом, однако, отмечены более высокие значения удельной массы листьев, более высокая активность фотосинтетического аппарата. В конечном итоге увеличение доли фотонов ДКС в спектре облучения растений в опытном варианте приводило к изменению накопления биомассы и химического состава корнеплодов. Происходило повышение накопления биомассы корнеплода на 38,7 %, сахаристости - на 0,65% по сравнению с контролем к 82 суткам.

Изменение соотношение КС/ДКС может влиять на морфогенез и ростовые процессы, фотосинтетический аппарат через фитохромную систему [15,16]. Характеристики растений, контролируемые фоторецепторами, включают размер, форму, высоту и углы формирования органов [17]. Li и Kubota [18] обнаружили значительное увеличение сухой массы, длины стебля, длины листьев и ширины листьев у растений листового салата с дополнительным ДКС по сравнению с белым светом, по-видимому, благодаря усиленному перехвату света увеличенной площадью листа под дополнительным

ДКС. Имеющиеся литературные данные показывают различное влияние ДК облучения и величины соотношения КС/ДКС на ростовые процессы, активность фотосинтетического аппарата и направленность метаболических процессов [19-20]. Очевидно, что реакция растений на действие света в красной области спектра определяется как величиной соотношения КС/ДКС, так и уровнем интенсивности света, видовыми особенностями растений, а также характером ответной реакции растений в процессе онтогенеза [21-23].

Полученные в работе результаты позволяют оценить влияние КС/ДКС на отдельные показатели роста и развития в онтогенезе растений, активность фотосинтетического аппарата в период активного нарастания листовой поверхности. Используемый подход и полученные данные могут быть использованы при разработке систем освещения растений сахарной свеклы на разных этапах онтогенеза при выращивании в закрытых контролируемых агробиотехносистемах для проведения селекционных работ в осенне-зимний-весенний периоды.

• Литература / References

1. Cary A., Mitchell F.S. LED advancements for plant-factory artificial lighting. Plant Factory (Second Edition). An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production / Editors Toyoki Kozai Genhua Niu Michiko Takagaki Acad. Press, 2020. P. 167-184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00010-8>
2. Yuanchun Ma, An Xu, Zong-Ming (Max). Cheng Effects of light emitting diode lights on plant growth, development and traits a meta-analysis. *Horticultural Plant Journal*. November 2021;7(6):552-564. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2020.05.007>
3. Smith H. Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982;33(1):481-518. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182>
4. Casal J.J. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annu Rev Plant Biol*. 2013;(64):403-427. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120221>
5. Grant R.H. Partitioning of biologically active radiation in plant canopies. *Int. J. Biometeorol*. 1997;(40):26-40.
6. Leduc N., Roman H., Barbier F., Péron T., Huché-Thélier L., Lothier J. et al. Light signaling in bud outgrowth and branching in plants. *Plants*. 2014;(3):223. <https://doi.org/10.3390/plants3020223>
7. Sasidharan R., Chinnappa C.C., Staal M., Elzenga J.T.M., Yokoyama R., Nishitani K. et al. Light quality-mediated petiole elongation in arabidopsis during shade avoidance involves cell wall modification by xyloglucan endotransglucosylase/hydrolases. *Plant Physiol*. 2010;(154):978-990. <https://doi.org/10.1104/pp.110.162057>
8. Bongers F.J., Evers J.B., Anten N.P.R., Pierik R. From shade avoidance responses to plant performance at vegetation level: using virtual plant modelling as a tool. *New Phytol*. 2014; (204):268-272. <https://doi.org/10.1111/nph.1304>
9. Yujin Park, Erik S. Runkle. Far-red Radiation Promotes Growth of Seedlings by Increasing Leaf Expansion and Whole-plant Net Assimilation. *Environmental and Experimental Botany*. April 2017;(136):41-49. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.013>
10. Tarakanov I.G., Kosobryukhov A.A., Tovstyko D.A., Anisimov A.A., Shulgina A.A., Sleptsov N.N., Kalashnikova E.A., Vassilev A.V., Kirakosyan R.N. Effects of light spectral quality on the micropropagated raspberry plants during ex vitro adaptation. *Plants*, 2021;10(10):2071. <https://doi.org/10.3390/plants10102071>
11. Sergejeva D., Alsina I., Duma M., Dubova L., Augspole I., Erdberga I., Berzina K. Evaluation of different lighting sources on the growth and chemical composition of lettuce. *Agronomy Research*. 2018;16(3):892-899. <https://doi.org/10.1515/AR.18.133>
12. Kim H.-J., Yang T., Choi S., Wang Y.-J., Lin M.-Y., Liceaga A.M. Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*. 2020;(261):108985. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108985>
11. Kurepin L.V., Emery R.J., Pharis R.P., Reid D.M. Uncoupling light quality from light irradiance effects in *Helianthus annuus* shoots: putative roles for plant hormones in leaf and internode growth. *J Exp Bot*. 2007;58(8):2145-57. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm068>
12. Feng Yanga, Lingyang Fenga, Qinlin Liua, Xiaoling Wua,

- Yuanfang Fana., Muhammad Ali Razaa, Yajiao Chenga, Junxu Chena, Xiaochun Wanga, Taiwen Yonga, Weiguo Liua, Jiang Liua, Junbo Dua, Kai Shua, Wenyu Yanga. Effect of interactions between light intensity and red-to-far-red ratio on the photosynthesis of soybean leaves under shade condition. *Environmental and Experimental Botany*. 2018;(150):79-87. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.008>
13. Zelenkov V.N., Vernik P.A., Latushkin V.V. Creating closed technobioecosystems (synergotron class) as a modern direction of using digital technologies for the development of Agrarian Science and solving tasks of the agrarian-industrial complex of Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019;(274):12101. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/274/1/>
14. Гольцев В.Н., Каладжи Х.М., Кузманова М.А. Аллахвердиев С.И. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла а – теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 220 с. [Goltsev V.N., Kaladzhii H.M., Kuzmanova M.A. Allahverdiev S.I. Variable and delayed fluorescence of chlorophyll a – theoretical foundations and practical application in plant research. M.–Izhevsk: Institute of Computer Research, 2014. 220 p. (In Russ.)]
15. Carvalho R.F., Campos M.L., Azevedo R.A. The role of phytochrome in stress tolerance. *J. Integr. Plant Biol*. 2011;53(12):920-929. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2011.01081.x>
16. Kreslavski V.D., Los D.A., Schmitt F.-J., Zharmukhamedov S.K., Kuznetsov V.V., Allahverdiev S.I. The impact of the phytochromes on photosynthetic processes. *Biochim Biophys Acta Bioenerg*. 2018 May;1859(5):400-408. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2018.03.003>
17. Franklin K.A., Lerner V.S., Whitelam G.C. The signal transducing photoreceptors of plants. *Int. J. Dev. Biol*. 2005;49(5-6):653-64. <https://doi.org/10.1387/ijdb.051989kf>
18. Li Q., Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ. Exp. Bot*. 2009;67(1):59-64. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.011>
19. Heraut-Bron V., Robin C., Varlet-Grancher C., Affif D., Guckert A.. Light quality (red:far-red ratio): does it affect photosynthetic activity, net CO₂ assimilation, and morphology of young white clover leaves? *Canadian Journal of Botany*. February 2011;77(10):1425-1431. <https://doi.org/10.1139/b99-099>
20. Zhen S.Y., van Iersel M.W. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *J. Plant Physiol*. 2017;(209):115-122. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>
21. Ballaré C.L., Scopel A.L., Sánchez R.A. Plant photomorphogenesis in canopies, crop growth, and yield. *HortScience*. 1997;(30):1172-1181.
22. Marchiori P.E.R., Machado, E.C., Ribeiro, R.V. Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. *Field Crops Research*. January 2013;(155):30-37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.025>
23. Yang F., Huang S., Gao R.C., Liu W.G., Yong T.W., Wang X.C., Wu X.L., Yang W.Y. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: far-red ratio. *Field Crop Res*. 2014;(155):45-253. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.011>

Об авторах:

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

Валерий Николаевич Зеленков – к.х.н., д.с.-х.н., проф., гл. науч. сотр., <https://orcid.org/0000-0001-5481-2723>, автор для переписки, zelenkov-raen@mail.ru

Вячеслав Васильевич Латушкин – к.с.-х.н., вед. науч. сотр., <https://orcid.org/0000-0003-1406-8965>, slavalat@yandex.ru

Анатолий Александрович Кособрых – д.б.н., вед. науч. сотр., <https://orcid.org/0000-0003-3388-5784>, kosobr@rambler.ru

Людмила Николаевна Путилина – к.с.-х.н., вед. науч. сотр., <https://orcid.org/0000-0002-5991-5235>

Мария Ивановна Иванова – д.с.-х.н., проф. РАН, гл. науч. сотр., <https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>, ivanova_170@mail.ru

Владимир Борисович Новиков – нач. инженерного отдела, <https://orcid.org/0000-0003-1406-8965>, engin.food@gmail.com

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

About the Authors:

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

Valery N. Zelenkov – Doc. 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

Anatoly A. Kosobryukhov – Doc. Sci. (Biology), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3388-5784>, kosobr@rambler.ru

Vladimir B. Novikov – Head of Engineering Department, <https://orcid.org/0000-0003-1406-8965>, engin.food@gmail.com

Lyudmila N. Putilina – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5991-5235>

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

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