

УДК 58.084.1

С.А. Ушакова, Я.А. Григоращенко,  
В.Н. Шихов, В.Е. Чернов, А.А. Тихомиров

**ВЛИЯНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ  
РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ РАСТЕНИЙ СОИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ\***

S.A. Ushakova, Ya A. Grigorashchenko,  
V.N. Shikhov, V.E. Chernov, A.A. Tikhomirov

**LIGHT EMISSION EFFECT OF LED IRRADIATORS ON GROWTH AND DEVELOPMENT OF SOY  
OF DIFFERENT VARIETIES IN THE CONDITIONS OF INTENSIVE LIGHT CULTURE**

**Ушакова С.А.** – канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

**Григоращенко Я.А.** – студ. 4-го курса Института фундаментальной биологии и биотехнологии Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: grigorashchenko.yana@rambler.ru

**Шихов В.Н.** – канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: v\_shikhov@ibp.ru

**Чернов В.Е.** – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. молекулярной и экологической генетики Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург. E-mail: ownvchern154@mail.ru

**Тихомиров А.А.** – д-р биол. наук, проф., зав. лаб. управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН, г. Красноярск. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

**Ushakova S.A.** – Cand. Biol. Sci., Leading Staff Scientist, Lab. of Phototrophes Biosynthesis Management, Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: sofya-ushakova@yandex.ru

**Grigorashchenko Ya.A.** – 4-year Student, Institute of Fundamental Biology and Biotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: grigorashchenko.yana@rambler.ru

**Shikhov V.N.** – Cand. Biol. Sci., Staff Scientist, Lab. of Phototrophes Biosynthesis Management, Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: v\_shikhov@ibp.ru

**Chernov V.E.** – Cand. Biol. Sci., Senior Staff Scientist, Lab. of Molecular and Ecological Genetics, Federal Research Center, All-Russian Institute of Genetic Resources of Plants named after N.I. Vavilov, St. Petersburg. E-mail: ownvchern154@mail.ru

**Tikhomirov A.A.** – Dr. Biol. Sci., Prof., Head, Lab. of Phototrophes Biosynthesis Management, Institute of Biophysics, SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Целью исследования являлась сравнительная оценка продукционной деятельности нескольких сортов сои, выращенных под светодиодными облучателями с белым светом или со спектром, подобным спектру поглощения зеленых пигментов (фитоспектр). В качестве объектов исследования были выбраны растения сои культурной (*Glycine max* L.) 4 сортов: 1040-4-2 (Швеция, 2013), Светлая (Рязанский НИИСХ, 2013), ПЭП 27 (ВИР, Ленинградская обл., 2012), ПЭП 28 (ВИР, Ленинградская обл., 2012). Растения выращивали при фотопериоде 16 ч света и 8 ч темноты методом гидропоники на керамзите. В качестве пита-

тельного раствора использовали раствор «Кнопа» с добавлением цитрата железа и микроэлементов. Источниками света служили светодиодные облучатели с белым светом и фитоспектром, имеющим максимум излучения в синей и красной областях спектра фотосинтетически активной радиации (ФАР). Интенсивность ФАР на уровне листьев верхнего яруса составляла  $690 \pm 70$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) под светильником с фитоспектром и  $620 \pm 60$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) под светильником с белым светом. Температуру воздуха в камере поддерживали на уровне 23–25 °С. Концентрация СО<sub>2</sub> была естественной (0,036 %).

\*Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы по теме № 56.1.4 «Оценка устойчивости ценозов высших растений замкнутых экологических систем, включающих человека, к выращиванию на питательных средах из минерализованных органических отходов».

По результатам исследований, в зависимости от сорта выращивание растений сои под светодиодными облучателями с фотоспектром или не оказывало достоверного влияния на биомассу растений, или приводило к снижению как общей биомассы растений, так и семян по сравнению с растениями, выращенными под светодиодными облучателями с белым светом. Из сравнения продуктивности исследуемых сортов для включения в состав БТСЖО (биолого-технических систем жизнеобеспечения) предпочтение следует отдать сорту 1040-4-2 (Швеция, 2013), у которого наблюдалось лучшее соотношение массы семян, Кхоз. и содержания сырого протеина. Применительно к БТСЖО целесообразно в дальнейших экспериментах по выращиванию сои использовать светодиодные облучатели с излучением, близким к белому свету.

**Ключевые слова:** светодиоды, спектр излучения, соя, продуктивность.

The study was aimed at comparative estimation of productive action of several soy varieties grown under LED irradiators emitting white light or LED irradiators emitting the radiation similar to the spectrum of green pigments' absorption (phytospectrum). Four soy (*Glycine max* L) varieties, notably, 1040-4-2 (Sweden, 2013), «Light» (Ryazan SRIAC 2013), PEP 27 (VIR, Leningrad region, 2012), PEP 28 (VIR, Leningrad region, 2012) were taken as the research subjects. The plants were grown at the photoperiod equal to 16 h by the light and 8 h in the dark by hydroponics method on expanded clay aggregate. Knop solution with addition of iron citrate and microelements was used as a nutrient solution. The white light LED irradiators and LED irradiators with phytospectrum having radiation maximum in blue and red spectrum regions of photosynthetic active radiation (PAR) served as the light sources. PAR intensity at the level of the leaves' upper layer was  $690 \pm 70 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$  under the LED irradiator with phytospectrum and  $620 \pm 60 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$  under the LED irradiators emitting white light. Air temperature was kept at the level of 23–25 °C in the chamber. The CO<sub>2</sub> concentration was natural (0.036 As the researches showed depending on a variety the soy cultivation under the LED irradiators with phytospectrum either did not reliably affect the plants' biomass or resulted in decreasing of both total plants' biomass and the seeds as compared with the plants grown under the LED irradiators emitting white light. In productivity

comparison of the varieties under study for their further inclusion into the BTLSS structure it should be given preference to the variety 1040-4-2 (Sweden, 2013) demonstrated the best correlation of the seeds mass, harvest index and the raw protein content. As applied to biological-technical life support systems (BTLSS) is advisable to use the LED irradiators close to white light at further experiments of soy cultivation.

**Keywords:** light emitting diodes, radiation spectrum, soy, productivity.

**Введение.** Осуществление космических миссий длительного срока функционирования невозможно без создания биолого-технических систем жизнеобеспечения экипажа (БТСЖО), регенерирующих среду обитания человека за счет физико-химических и биологических процессов [1, 2]. Кроме регенерации воздушной среды и воды, биологический способ предполагает за счет культивирования высших растений и воспроизводство растительной части диеты человека. Реальное удовлетворение потребностей человека всеми продуктами растительного происхождения возможно только за счет многокомпонентного звена высших растений. Особый интерес представляет возможность включения растений сои в состав растительного звена БТСЖО, так как соя – одна из самых универсальных в применении сельскохозяйственных культур [3–5]. Зерно сои – высокоэффективный пищевой продукт: оно богато белком (36,7 %), незаменимыми аминокислотами и липидами (17,8 %) [6].

В состав белков зерна сои входит фермент уреазы, которая может быть использована для разложения мочевины, входящей в состав урины человека [7]. Такой источник уреазы не требует создания специальных запасов в БТСЖО и не подрывает уровень замкнутости круговоротных процессов.

Включение любого вида растений в состав растительного звена БТСЖО требует подбора условий выращивания, обеспечивающих, с одной стороны, получение максимальной продуктивности, с другой стороны, минимизацию энергетических затрат на их выращивание. Кроме того, необходимо, по возможности, унифицировать условия выращивания культур, входящих в состав БТСЖО. Поэтому применительно к БТСЖО особенно важен выбор источников излучения, обладающих высокой биологической эффективностью. Появление на рынке новых

светодиодных облучателей, позволяющих гибко управлять спектральным потоком в различные фазы развития растений и имеющих более высокий энергетический КПД по преобразованию подводимой электрической мощности в световую энергию по сравнению с ранее используемыми источниками света, упрощает задачу такого выбора [8–13]. Известно, что спектральный состав света оказывает существенное влияние на продуктивность растений, анатомию, морфологию и физиологию растений [14–16]. Комбинирование синего и красного света в последнее время все более и более используется не только в научных исследованиях, но и в условиях искусственного земледелия [16]. В то же время показано, что комбинирование зеленого или белого света со спектром излучения синих и красных светодиодов положительно влияет на рост, развитие и качество съедобной биомассы ряда исследуемых культур [13, 17]. При этом фотобиологическая эффективность спектра в значительной степени зависит от видовых особенностей растений, фазы развития, структуры ценоза и условий выращивания [9, 14, 15, 18].

**Цель исследования:** сравнительная оценка продукционной деятельности нескольких сортов сои, выращенных под светодиодными облучателями с белым светом или с фитоспектром, применительно к БТСЖО.

**Объекты и методика исследования.** В качестве объектов исследования были выбраны растения сои культурной (*Glycine max* L.) 1040-4-2 (Швеция, 2013), Светлая (Рязанский НИИСХ, 2013), ПЭП 27 (ВИР, Ленинградская обл., 2012), ПЭП 28 (ВИР, Ленинградская обл., 2012).

Растения выращивали при фотопериоде 16 ч света и 8 ч темноты, методом гидропоники на керамзите. В качестве питательного раствора использовали раствор «Кноп» с добавлением цитрата железа и микроэлементов. Источниками света служили экспериментальные светодиодные облучатели с фитоспектром, имеющим максимум излучения в синей и красной областях спектра фотосинтетически активной радиации (ФАР), и светодиодные облучатели, вызывающие зрительное ощущение белого света (далее по тексту «белый свет»). На рисунке 1 показаны спектры излучения используемых светодиодных облучателей, измеренных с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-ULS2048L-USB2 (Нидерланды).

Интенсивность ФАР на уровне листьев верхнего яруса составила  $690 \pm 70$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) под светильником с фитоспектром и  $620 \pm 60$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) под светильником, излучение которого воспринимается глазом человека как «белый свет». Температуру воздуха в камере поддерживали на уровне 23–25 °С. Концентрация CO<sub>2</sub> была естественной (0,036 %).

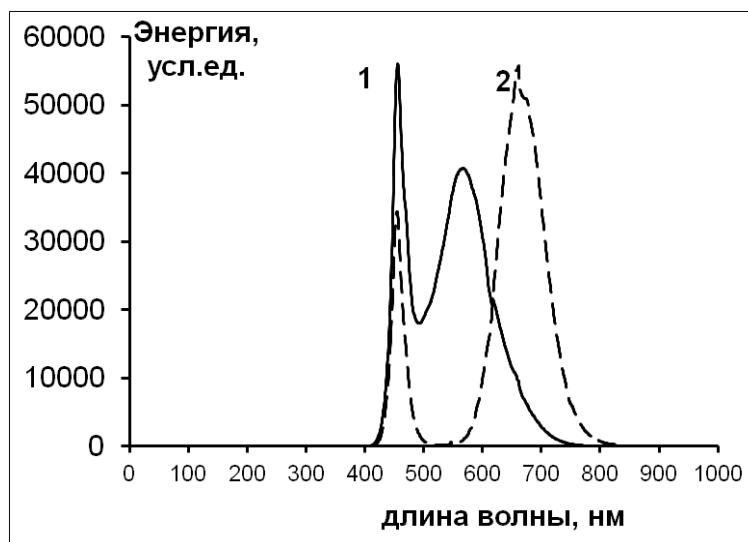


Рис. 1. Белый свет (1) и фитоспектр (2) светодиодных излучателей

Плотность посева была 90 растений на 1 м<sup>2</sup>. Длительность вегетационного периода – 72 суток. В таблице и на графиках рисунка 2 пред-

ставлены данные в виде средних арифметических значений  $\pm$  ошибка средней арифметической из двух биологических повторностей. В

каждой биологической повторности было по 6 растений. Достоверность различий между средними определяли по  $t$ -критерию Стьюдента при уровне значимости  $P < 0,05$ .

Высоту растений (от уровня посева до верхней точки стебля) и количество листьев определяли до достижения растениями возраста 35 суток. Содержание сырого протеина в семенах оценивали по содержанию азота с учетом перерасчетного коэффициента [19].

Активность уреазы в семенах растений сои определяли методом, основанным на учете количества аммиачного азота, образовавшегося в

единицу времени при разложении мочевины под действием препарата фермента, выделенного из растений [19].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Проведенные исследования показали, что спектральный состав света, вне зависимости от исследуемых сортов, оказал существенное влияние на высоту растений. К моменту перехода в фазу цветения и плодоношения высота растений, выращенных под облучателями белого света, оказалась достоверно ниже, чем у растений, выращенных под облучателями с фитоспектром (рис. 2).

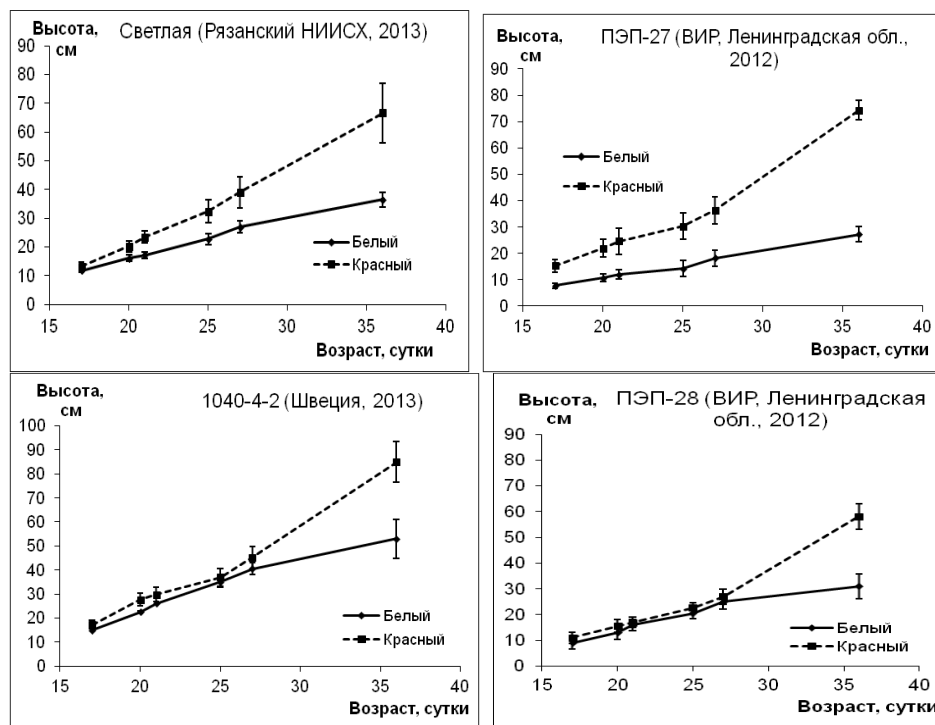


Рис. 2. Высота растений сои разных сортов, выращенных под светодиодными облучателями с белым светом и облучателями с фитоспектром, в зависимости от возраста растений (на графиках представлены данные в виде средних арифметических значений)

При этом количество листьев на растениях, выращенных под белым светом, достоверно не отличалось от количества листьев у растений, выращенных под фитоспектром. Большая высота растений под фитоспектром связана с растяжением междоузлий.

На темпы развития растений спектр излучения значимого влияния не оказал: к 36-суточному возрасту от всходов все растения находились на стадии цветения и плодоношения.

Сырая масса растений сои сорта Светлая, выращенных под фитоспектром, достоверно не отличалась от сырой массы растений этого же сорта, выращенных под белым светом. Сырая масса растений остальных сортов, выращенных под фитоспектром, была достоверно ниже биомассы аналогичных сортов, выращенных под белым светом (рис. 3).

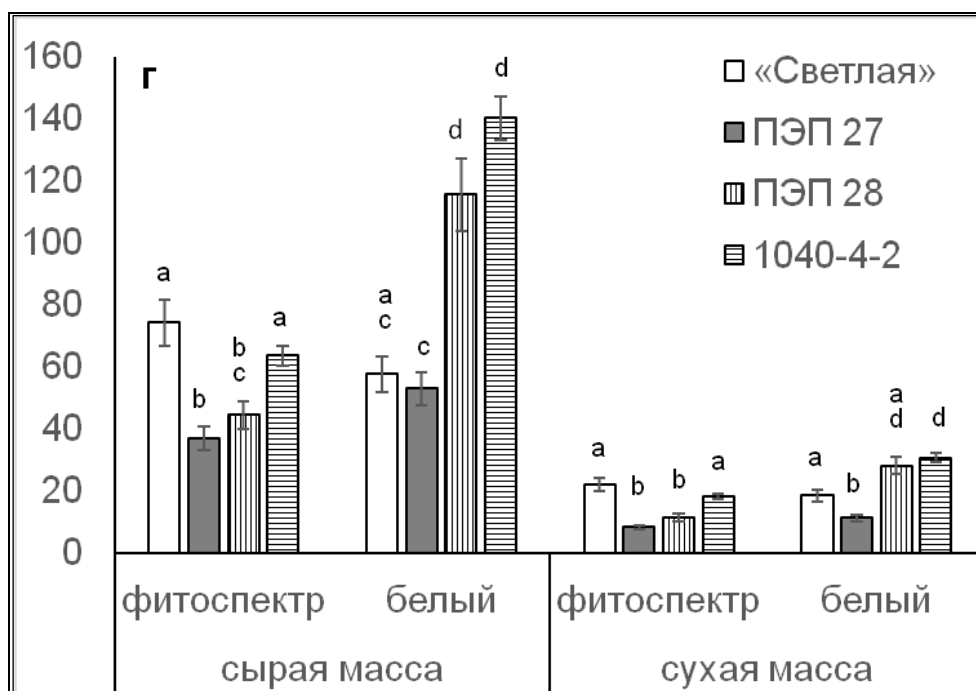


Рис. 3. Масса растений сои разных сортов, выращенных под светодиодными облучателями с белым светом и облучателями с фитоспектром (значения одного и того же показателя с разными буквами над колонками имеют достоверные отличия (критерий Стьюдента,  $P < 0,05$ ))

В основном различия в сырой биомассе растений сортов Светлая, ПЭП 27 связаны с различной оводненностью надземных органов к моменту уборки растений, так как спектральный состав света не оказал достоверного влияния на сухую биомассу растений сои этих сортов. Только у растений сои сортов ПЭП 28 и 1040-4-2 при выращивании под белым светом наблюдалось достоверное увеличение не только сырой, но и сухой биомассы (рис. 3).

Сырая и сухая масса семян сорта Светлая и сухая масса семян сорта ПЭП 27 не зависели от спектра излучения светодиодных облучателей. Сырая и сухая масса семян сортов ПЭП 28 и 1040-4-2, выращенных под светодиодами с белым светом, были в 2,3 и 1,8 раза соответственно выше, чем под светодиодами с фитоспектром (рис. 4).

Самый низкий коэффициент хозяйственной годности Кхоз. (около 38 %), вне зависимости от спектра облучения, был у растений сои сорта

ПЭП 27. У растений сои остальных сортов Кхоз находился в пределах 47–50 %. При этом самый высокий Кхоз. (50,5 %) был у растений сои сорта 1040-4-2, выращенных под светодиодами с белым светом.

Спектральный состав света не оказал значимого влияния на содержание сырого протеина в семенах сои, за исключением сорта ПЭП 28, в семенах которого с белого света содержание сырого протеина оказалось на 23 % меньше, чем в семенах сои с фитоспектра (табл.).

Спектральный состав света не оказал достоверного влияния на активность уреазы семян сои трех сортов, и только активность уреазы в семенах сои сорта ПЭП 27, выращенных под белым светом, оказалась достоверно ниже, чем таковая в семенах сои, выращенных под фитоспектром (см. табл.). Вне зависимости от спектра облучения активность уреазы в семенах сортов Светлая и ПЭП 27 была выше, чем в семенах сои остальных исследованных сортов.

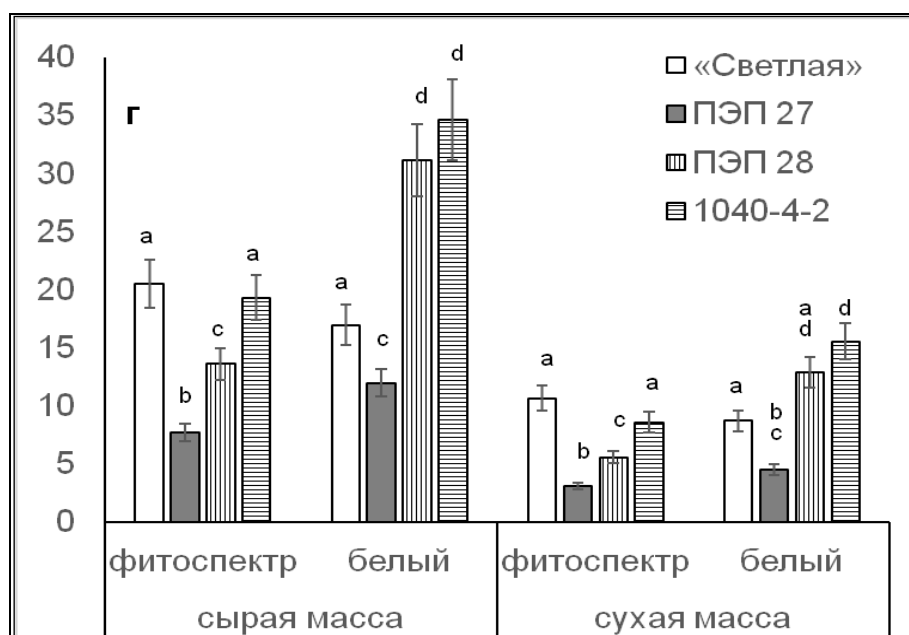


Рис. 4. Масса семян растений сои разных сортов, выращенных под светодиодными облучателями с белым светом и облучателями с фитоспектром (значения одного и того же показателя с разными буквами над колонками имеют достоверные отличия (критерий Стьюдента,  $P < 0,05$ ))

#### Активность уреазы и содержание сырого протеина в семенах растений сои разных сортов, выращенных под светодиодными облучателями белого света и облучателями с фитоспектром

| Сорт     | Активность уреазы в семенах, мкг/г в мин |                       | Сырой протеин, %       |                        |
|----------|--|-----------------------|------------------------|------------------------|
|          | Фитоспектр                               | Белый свет            | Фитоспектр             | Белый свет             |
| Светлая  | 18,3±1,5 <sup>a</sup>                    | 20,7±1,8 <sup>a</sup> | 32,0±2,6 <sup>a</sup>  | 31,1±2,5 <sup>a</sup>  |
| ПЭП 27   | 23,3±1,7 <sup>a</sup>                    | 15,5±1,6 <sup>b</sup> | 27,6±2,1 <sup>ab</sup> | 26,2±2,5 <sup>ab</sup> |
| ПЭП 28   | 13,3±1,4 <sup>b</sup>                    | 12,9±1,0 <sup>b</sup> | 30,0±2,2 <sup>a</sup>  | 23,1±2,0 <sup>b</sup>  |
| 1040-4-2 | 13,8±1,1 <sup>b</sup>                    | 11,5±0,9 <sup>b</sup> | 30,1±2,3 <sup>a</sup>  | 29,1±2,1 <sup>ab</sup> |

Примечание: значения одного и того же показателя с разными надстрочными буквами имеют достоверные отличия (критерий Стьюдента,  $P < 0,05$ ).

**Заключение.** Как показало проведенное исследование, выращивание растений сои под светодиодными облучателями с фитоспектром с увеличенной долей излучения в красной области спектра и с отсутствием излучения в зеленой области привело к растяжению междоузлий без увеличения массы растений. Более того, выращивание растений сои под светодиодными облучателями с фитоспектром или не оказывало достоверного влияния на биомассу растений, или приводило к снижению как общей биомассы, так и семян по сравнению с растениями, выращенными под светодиодными облучателями с белым светом. Из сравнения продуктивности исследуемых сортов для включе-

ния в состав БТСЖО предпочтение следует отдать сорту 1040-4-2 (Швеция, 2013), у которого наблюдалось лучшее соотношение массы семян, Кхоз. и содержания сырого протеина. Если оценивать растения и по активности уреазы, следует обратить внимание на растения сои сорта Светлая, которая показала несколько меньшую продуктивность, но в семенах которой активность уреазы была выше, чем в семенах сои сорта 1040-4-2 (Швеция, 2013). Вполне вероятно, что при выборе сорта сои из числа исследованных сортов для включения в состав растительного звена БТСЖО целесообразно использовать эти 2 сорта. В таком случае будут удовлетворены потребности человека как с це-

лью получения ценного пищевого продукта, так и с целью непрерывного получения фермента уреазы для решения технологических проблем.

Тот факт, что оба эти сорта при выращивании на белом свете не снижают продуктивность, хорошо сочетаются с тем фактом, что при выборе спектра ФАР следует учитывать следующее: цветопередача и стабильность зрения человека лучше всего соответствуют белому свету. Поэтому такой выбор спектра для выращивания растений как в БТСЖО, так и в условиях интенсивной светокультуры удачно согласуется с решением проблемы цветопередачи в световой среде обитания человека. Применительно к БТСЖО в этой ситуации целесообразно в дальнейших экспериментах по выращиванию сои использовать светодиодные облучатели с близким к белому свету спектром излучения в области ФАР.

### Литература

1. Гительзон И., Дегерменджи А., Тихомиров А. Замкнутые системы жизнеобеспечения // Наука в России. – 2011. – № 6. – С. 4–10.
2. Дегерменджи А.Г., Тихомиров А.А. Создание искусственных замкнутых систем земного и космического назначения // Вестн. Российской академии наук. – 2014. – Т. 84. – № 3. – С. 233–240.
3. Доценко С.М., Каленик Т.К., Фомин А.В. и др. Разработка биотехнологии пищевых концентратов с использованием соево-овощных компонентов // Вестн. КрасГАУ. – 2010. – Вып. 9. – С. 174–176.
4. Micco V. De., Buonomo Roberta, Paradiso Roberta et al. Soybean cultivar selection for Bioregenerative Life Support Systems (BLSS) – Theoretical selection // Advances in Space Research. – 2012. – V. 49. – P. 1415–1421.
5. Minjuan Wang, Yuming Fu, Hong Liu. Nutritional quality and ions uptake to PTNDS in soybeans [J] // Food Chemistry. – 2016. – № 192(0). – P. 750–759.
6. Петибская В.С. Соя: химический состав и использование. – Майкоп: Полиграф-ЮГ, 2012. – 432 с.
7. Ushakova S.A., Tikhomirov A.A., Tikhomirova N.A. et al. A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems // Advances in Space Research. – 2012. – V. 50. – P. 932–940.
8. Bourget C.M. An introduction to light-emitting diodes // HortSci. – 2008. – V. 43. – P. 1944–1946.
9. Massa G.D., Kim H.H., Wheeler R.M. et al. Plant productivity in response to LED lighting // HortSci. – 2008. – V. 43. – P. 1951–1956.
10. Morrow R.C. LED lighting in horticulture // HortSci. – 2008. – V. 43. – P. 1947–1950.
11. Гужов С., Полищук А., Туркин А. Концепция применения светильников со светодиодами совместно с традиционными источниками света // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 14–18.
12. Dougher T., Bugbee, B. Long-term blue light effects on the histology of lettuce and soybean leaves and stems // J. Am. Soc. Hortic. Sci. – 2004. – V. 129. – P. 467–472.
13. Kuan-Hung Lina, Meng-Yuan Huangb, Wen-Dar Huangc et al. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Capitata) // Scientia Horticulturae. – 2013. – V. 150. – P. 86–91.
14. Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. – Новосибирск: Наука, 1991. – 167 с.
15. Hanyu H., Shoji K. Acceleration of growth in spinach by short-term exposure to red and blue light at the beginning and at the end of the daily dark period // Acta Hortic. – 2002. – № 580. – P. 145–150.
16. Hogewoning S.W., Trouwborst G., Maljaars H. et al. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light // J. Exp. Bot. – 2010. – V. 61. – P. 3107–3117.
17. C. Dong Y. Fu, G. Liu, H. Liu. Growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to LED light sources with different spectra combinations // J. Agro. Crop Sci. – 2014. – V. 200. – Issue 3. – P. 163–236.
18. Лисовский Г.М., Долгушев В.А. Очерки частной светокультуры растений. – Новосибирск: Наука, 1986. – 128 с.
19. Плешков Б.П. Практикум по биохимии растений: учеб. пособие для вузов. – М.: Колос, 1976. – 256 с.

## Literatura

1. *Gitel'zon I., Degermendzhi A., Tihomirov A.* Zamknutyje sistemy zhizneobespechenija // Nauka v Rossii. – 2011. – № 6. – S. 4–10.
2. *Degermendzhi A.G., Tihomirov A.A.* Sozdanie iskusstvennyh zamknutyh sistem zemnogo i kosmicheskogo naznachenija // Vestn. Rossijskoj akademii nauk. – 2014. – T. 84. – № 3. – S. 233–240.
3. *Docenko S.M., Kalenik T.K., Fomin A.V. i dr.* Razrabotka biotehnologii pishhevych koncentratov s ispol'zovaniem soevo-ovoshhnyh komponentov // Vestn. KrasGAU. – 2010. – Vyp. 9. – S. 174–176.
4. *Micco V. De., Buonomo Roberta, Paradiso Roberta, et al.* Soybean cultivar selection for Bioregenerative Life Support Systems (BLSS) – Theoretical selection // Advances in Space Research. – 2012. – V. 49. – P. 1415–1421.
5. *Minjuan Wang, Yuming Fu, Hong Liu.* Nutritional quality and ions uptake to PTNDS in soybeans [J] // Food Chemistry. – 2016. – № 192(0). – P. 750–759.
6. *Petibskaja V.S.* Soja: himicheskij sostav i ispol'zovanie. – Majkop: Poligraf-JuG, 2012. – 432 s.
7. *Ushakova S.A., Tikhomirov A.A., Tikhomirova N.A. et al.* A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems // Advances in Space Research. – 2012. – V. 50. – P. 932–940.
8. *Bourget C.M.* An introduction to light-emitting diodes // HortSci. – 2008. – V. 43. – P. 1944–1946.
9. *Massa G.D., Kim H.H., Wheeler R.M. et al.* Plant productivity in response to LED lighting // HortSci. – 2008. – V. 43. – P. 1951–1956.
10. *Morrow R.C.* LED lighting in horticulture // HortSci. – 2008. – V. 43. – P. 1947–1950.
11. *Guzhov S., Polishhuk A., Turkin A.* koncepcija primeneniya svetil'nikov so svetodiodami sov-mestno s tradicionnymi istochnikami sveta // Sovremennye tehnologii avtomatizacii. – 2008. – № 1. – S. 14–18.
12. *Dougher T., Bugbee, B.* Long-term blue light effects on the histology of lettuce and soybean leaves and stems // J. Am. Soc. Hortic. Sci. – 2004. – V. 129. – P. 467–472.
13. *Kuan-Hung Lina, Meng-Yuan Huangb, Wen-Dar Huangc et al.* The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Capitata*) // Scientia Horticulturae. – 2013. – V. 150. – P. 86–91.
14. *Tihomirov A.A., Lisovskij G.M., Sid'ko F.Ja.* Spektral'nyj sostav sveta i produktivnost' rastenij. – Novosibirsk: Nauka, 1991. – 167 s.
15. *Hanyu H., Shoji K.* Acceleration of growth in spinach by short-term exposure to red and blue light at the beginning and at the end of the daily dark period // Acta Hortic. – 2002. – № 580. – P. 145–150.
16. *Hogewoning S.W., Trouwborst G., Maljaars H. et al.* Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light // J. Exp. Bot. – 2010. – V. 61. – P. 3107–3117.
17. *C. Dong Y. Fu, G. Liu, H. Liu.* Growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to LED light sources with different spectra combinations // J. Agro. Crop Sci. – 2014. – V. 200. – Issue 3. – P. 163–236.
18. *Lisovskij G.M., Dolgushev V.A.* Oчерki chastnoj svetokul'tury rastenij. – Novosibirsk: Nauka, 1986. – 128 s.
19. *Pleshkov B.P.* Praktikum po biohimii rastenij: ucheb. posobie dlja vuzov. – M.: Kolos, 1976. – 256 s.

