

4.1.1. ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО  
(СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 633.111; 633.161

DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2023\_3\_29

EDN: QHTCEY

**Влияние спектрального состава света на накопление фотосинтетических пигментов и урожайность зерновых культур при выращивании в контролируемых условиях****Алексей Семёнович Дорохов<sup>1</sup>, Владимир Валентинович Пыльнев<sup>2</sup>, Наталья Александровна Семенова<sup>3</sup>, Мария Сергеевна Широкова<sup>4</sup>, Нарек Овикович Чилингарян<sup>5</sup>**<sup>1, 3, 4, 5</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия<sup>5</sup>narek-s@list.ru

**Аннотация.** В соответствии с утвержденной Доктриной продовольственной безопасности РФ отечественное семеноводство должно обеспечить семенами не менее 75% российского рынка, и по многим зерновым культурам этот показатель уже превышает установленный минимум. Однако до сих пор существует комплекс проблем в селекции и семеноводстве таких важных продовольственных культур, как сахарная свекла, подсолнечник, картофель, кукуруза, ячмень и др. Для интенсификации селекционного процесса необходимо внедрение новейших технологий и специальных средств, что позволяет существенно сократить срок создания новых гибридов обеспечивающих получение нескольких поколений гибридных популяций и родительских линий гибридов в год. В контролируемых условиях выращивания существует техническая возможность досветки растений посредством использования различных осветительных приборов. В климатической камере, разработанной в ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», в 2022 г. были проведены исследования с целью изучения влияния спектрального состава света на урожайность яровой пшеницы и ячменя. Эксперимент был проведен при 3 вариантах освещения – В15G40R40FR5 (В1 – контроль), В22G11R49FR18 (В2) и В16G18R51FR15 (В3). Концентрация фотосинтетических пигментов растений пшеницы в фазе выхода в трубку была выше, чем у ячменя на протяжении всего опыта. У пшеницы отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* находилось в пределах нормы для периода активной вегетации, а ячмень испытывал стресс от недостатка освещенности. Все варианты освещения, используемые в опыте, пригодны для получения семян пшеницы с кондиционной всхожестью на уровне 95,7–97,7%. Лучшим для пшеницы было освещение по варианту В2 (В22G11R49FR18) с наибольшей долей синего и дальнего красного облучения. Варианты освещения В1 и В2, используемые в опыте, пригодны для получения зерен ячменя, отличающихся высокой всхожестью (на уровне 92–93%). Лучшим для ячменя было освещение по варианту В3 (В16G18R51FR15).

**Ключевые слова:** зерновые культуры, пшеница, ячмень, фотосинтетические пигменты, спектральный состав, климатическая камера, фитотрон

**Для цитирования:** Дорохов А.С., Пыльнев В.В., Семенова Н.А., Широкова М.С., Чилингарян Н.О. Влияние спектрального состава света на накопление фотосинтетических пигментов и урожайность зерновых культур при выращивании в контролируемых условиях // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 3(78). С. 29–41. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2023\\_3\\_29](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_29)–41.

4.1.1. GENERAL SOIL MANAGEMENT AND CROP SCIENCE  
(AGRICULTURAL SCIENCES)

Original article

**Effect of spectral composition of light on the accumulation of photosynthetic pigments and yield of grain crops grown in controlled conditions****Aleksey S. Dorokhov<sup>1</sup>, Vladimir V. Pylnev<sup>2</sup>, Natalya A. Semenova<sup>3</sup>, Maria S. Shirokova<sup>4</sup>, Narek O. Chilingaryan<sup>5</sup>**<sup>1, 3, 4, 5</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia<sup>2</sup>Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia<sup>5</sup>narek-s@list.ru

**Abstract.** In accordance with the approved Doctrine of Food Security of the Russian Federation, domestic seed production should provide at least 75% of the Russian market with seeds, and for many grain crops this indicator already exceeds the established minimum. However, there is still a complex of problems in the breeding and seed production of such important food crops as sugar beet, sunflower, potatoes, corn, barley, etc. Intensification of

selective breeding of plants is of great importance, since there are still problems with in-country selection and seed production of some crops. This requires the implementation of innovative technologies and special means that allow obtaining several generations per year, which will significantly reduce the time for creating new varieties. In 2022 the authors performed a research in a climate chamber developed by the Federal Scientific Agro-engineering Center VIM. The objective of research was to study the effect of spectral composition of light on the yield of spring wheat and barley and to evaluate the accumulation of photosynthetic pigments in grain crops grown in a climate chamber. The experiment included 3 lighting variants: B15G40R40FR5 (V1; control), B22G11R49FR18 (V2), and B16G18R51FR15 (V3). The concentration of photosynthetic pigments in wheat plants in the booting stage was higher than that of barley throughout the whole experiment. Chlorophyll *a/b* ratio in wheat was within the normal limits for the active growing season, whereas barley was stressed by lack of light. It has been found that all experimental lighting variants can be used to produce wheat seeds with standard germinability of 95.7-97.7%. The best lighting variant for wheat was V2 (B22G11R49FR18) with the highest proportion of blue and far-red radiation. V1 and V2 lighting variants used in the experiment are suitable for obtaining barley grains with high germinability (92-93%). The best lighting variant for barley was V3 (B16G18R51FR15).

**Key words:** grain crops, wheat, barley, photosynthetic pigments, spectral composition, climate chamber, phytotron

**For citation:** Dorokhov A.S., Pylnev V.V., Semenova N.A., Shirokova M.S., Chilingaryan N.O. Effect of spectral composition of light on the accumulation of photosynthetic pigments and yield of grain crops grown in controlled conditions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(3):29-41. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2023\\_3\\_29-41](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_29-41).

## Введение

Импортозамещение в сфере производства семян сельскохозяйственных культур в условиях кризиса в мировой экономике и введенных против Российской Федерации санкций приобретает особую актуальность. В соответствии с утвержденной Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации отечественное семеноводство должно обеспечить семенами не менее 75% российского рынка, и по многим зерновым культурам этот показатель уже превышает установленный минимум [5]. Однако до сих пор существует комплекс проблем в селекции и семеноводстве таких важных для страны продовольственных культур, как сахарная свекла, подсолнечник, картофель, кукуруза, ячмень, рапс, овощные культуры закрытого грунта.

Для интенсификации селекционного процесса необходимо внедрение новейших технологий и технических средств, обеспечивающих получение нескольких поколений гибридных популяций и родительских линий гибридов. Для этого целесообразно использовать соответствующее оборудование, в частности климатические камеры (фитотроны) и современные теплицы, позволяющие получать несколько поколений в год, что дает возможность существенно сократить срок создания новых гибридов. В контролируемых условиях выращивания существует техническая возможность досветки растений посредством использования различных осветительных приборов.

Использование многоканальных светодиодных светильников, пофазно меняющих спектр света, позволяет:

- воздействовать на прорастание, снижая или повышая долю дальнего красного (FR) и зеленого (G) спектра света;
- усиливать активный рост растений, увеличивая долю красного (R) и зеленого спектра;
- регулировать размер листьев и стебля, а также активировать процессы плодоношения, изменяя долю синего (B) спектра.

Увеличением или уменьшением длины светового дня также можно стимулировать переход к генеративной фазе развития растений.

В селекционном фитотроне можно имитировать типичную динамику лимитирующих факторов для любой географической точки Земли [4], при этом время испытаний можно сократить до четырех месяцев. Использование фитотронов и климатических камер позволяет моделировать различные условия среды для селекционных оценок. Конечно, это не исключает проведение полевых испытаний, но позволяет создавать необходимый провокационный фон для получения необходимых данных, что не всегда воз-

можно при естественных условиях выращивания. Климатические камеры и теплицы позволяют также ускорить селекционный процесс за счет получения F<sub>2</sub> и более поздних (F<sub>5</sub> ... F<sub>n</sub>) поколений для отбора.

Производство LED-светильников внесло большой вклад в развитие светокультуры. Исследователи со всего мира изучали и продолжают изучать воздействие различных длин световых волн на качественные и количественные характеристики растений.

Рядом исследователей было установлено, что излучение R-диапазона стимулирует рост и развитие зеленой и корневой частей проростков пшеницы в отличие от использования белого и синего диапазона освещения [1, 6].

Опубликованы результаты исследований, проведенных с использованием красных LED-светильников и флюоресцентных ламп дневного света с дополнительным облучением 1% или 10% синего спектра света от флюоресцентных ламп, которые показали противоположный эффект. Растения под LED-освещением R-диапазона спектра отставали в росте, но имели более длинные кроющие листья и главный стебель, а добавление синего спектра стимулировало накопление сухой массы и увеличивало скорость фотосинтеза [9].

Также опубликованы данные, подтверждающие, что R-диапазон облучения стимулирует прорастание и за счет этого в 2,5 раза ускоряется появление первого листа [11]. Под воздействием R-облучения в листьях проростков синтезируется больше углеводов, а В-облучения – больше белков [1, 7].

В экспериментах некоторых исследователей урожайность и продуктивная кустиность пшеницы, выращенной под воздействием R-светодиодов, была меньше, чем под белым спектром освещения, а добавление к R-освещению 10% В-диапазона от флюоресцентных ламп позволило выровнять показатели сухой массы и урожайности семян пшеницы по сравнению с вариантом выращивания при использовании белого света [9].

Большинство современных исследований сосредоточено на изучении наиболее популярных и энергоэффективных RB-светодиодов, так как спектры их излучения хорошо совпадают со спектрами поглощения основных фотосинтетических пигментов [15, 17]. Тем не менее доказано, что G-спектр также необходим растениям для предотвращения ингибирования генеративного развития [9, 10] и стимуляции роста листовой поверхности растений за счет усиления фотосинтеза нижних листьев [10, 12, 14, 20]. При этом доля G-облучения в общем PPF не должна превышать 50% [13]. Также отмечается, что дополнительное освещение растений G- и FR-светом способно увеличить сырую массу зеленых культур [16].

При выращивании злаковых в условиях полной светокультуры было установлено, что наиболее чувствительными к спектральному составу света являются растения ячменя, растения пшеницы – среднечувствительны, растения овса – наименее чувствительны [19].

Рекомендованы следующие оптимальные соотношения:

- R : В – 3 : 1 или 4 : 1;
- R : G – 3 : 5;
- R : Y (желтый) – 3 : 1 [19].

Целью представленного исследования являлось изучение влияния спектрального состава света на урожайность зерновых культур на примере ячменя и яровой пшеницы, а также оценка стрессового состояния этих культур по содержанию фотосинтетических пигментов при выращивании в климатических камерах (фитотронах).

#### **Материалы и методы**

Исследования проводили в лаборатории «Исследования технологических свойств сельскохозяйственных материалов» отдела «Закрытые искусственные агроэко-системы» ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва) в период с мая по август 2022 г.

### Объекты исследований

Пшеница мягкая яровая (*Triticum aestivum* L.) сорта Любава, разновидность *Lutescens* – среднеспелый сорт, вегетационный период составляет 70–86 дней, куст полупрямостоячий, растение среднерослое, содержание сырого протеина в зерне – 14,0–14,7%, масса 1000 зерен – 31–42 г.

Ячмень яровой двурядный (*Hordeum vulgare* L.) сорта Прерия, разновидность *Medicum* – среднеспелый сорт, вегетационный период составляет 77–90 дней, растение среднерослое, содержание белка в зерне – до 13–15%, масса 1000 зерен – 45–52 г.

### Условия выращивания

Растения выращивались в климатической камере, разработанной сотрудниками ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (рис. 1).



Рис. 1. Климатическая камера с растениями: а – общий вид; б – вид внутри

Климатическая камера представляет собой бокс размерами 2560 × 1960 × 2200 мм. Полезный объем для выращивания растений составлял 8,8 м<sup>3</sup>.

Камера оборудована системой автоматики для поддержания уровня влажности от 30 до 95% и температуры от 16 до 40 °С. Система автоматики позволяет также регулировать длительность и цикличность светового периода.

Камера оснащена пятиканальными управляемыми светильниками (LEDVIM-5), позволяющими изменять спектральный состав и интенсивность освещения. Во время проведения экспериментальных исследований температура в климатической камере составляла 25 °С, а относительная влажность воздуха поддерживалась на уровне 70%.

В вегетационные сосуды объемом 5 л засыпали по 3 см керамзита в качестве дренажа, затем субстрат – смесь грунта на основе верхового торфа низкой степени разложения (марка «Агробалт С») с дерново-подзолистой почвой в соотношении 1 : 1. Водообеспечение и минеральное питание растений осуществлялось путем периодического ручного полива водопроводной водой.

В экспериментах использовали следующие удобрения:

- при формировании первого узла вносили карбамид (N<sub>30</sub>);
- в фазе кущения – аммофос и хлористый калий (N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>120</sub>).

Для профилактики грибных заболеваний в фазе кущения проводили опрыскивание растений биопрепаратом Фитоспорин-М.

Эксперимент состоял из 3 вариантов освещения с применением различных спектров, в каждом варианте высаживали по 120 растений (по 12 вегетационных сосудов на 2-этажном стеллаже). Густота стояния растений составляла 263,1 шт./м<sup>2</sup>, расстояние между семенами – 3,5 см.

На основании проанализированных источников литературы для контрольного варианта освещения (В1) было решено использовать лампы, состоящие из наиболее распространенных белых светодиодов с соотношением спектра R : В около 3 : 1 [19], с G-облучением не более 50% [13] для стимуляции роста листовой поверхности растений за счет усиления фотосинтеза нижних листьев, а также минимальным FR-диапазоном (B15G40R40FR5). В остальных двух вариантах опыта (В2 и В3) использовались RB-светодиодные осветители с добавлением зеленых светодиодов с соотношениями спектров B22G11R49FR18 и B16G18R51FR15.

Величина плотности фотонного потока (PPFD – photosynthetic photon flux density) по вариантам опыта составляла  $200 \pm 5$  мкмоль·м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

#### **Лабораторные исследования**

В качестве критериев оценки влияния спектрального состава света на растения были выбраны морфологические показатели (высота, продуктивная кустистость, средняя длина и масса колоса, число зерен и их масса в колосе) и содержание основных фотосинтетических пигментов. Содержание фотосинтетических пигментов измеряли дважды – в фазе выхода в трубку и в фазе кущения, а морфологические показатели – в фазе полной спелости (рис. 2). Фаза выхода в трубку у ячменя и пшеницы была в одно время во всех вариантах освещения. Фаза кущения и фаза колошения пшеницы и ячменя наступила в условиях варианта В3 (B16G18R51FR15) быстрее, чем в остальных.

Пигменты (хлорофиллы и каротиноиды) экстрагировали 100% ацетоном. Навеску свежих листьев растений 100 мг взвешивали на аналитических весах LA 230S (Sartorius, Германия), затем измельчали и помещали в фарфоровую ступку с добавлением небольшого количества 100% ацетона и растирали. После растирания каждую порцию полученного раствора фильтровали и сливали в колбы 25 мл, далее доводили до метки ацетоном. Количественное содержание основных пигментов (хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов) в листьях определяли на спектрофотометре Спекс ССП-705М (ЗАО «Спектроскопические системы», Россия).

Особенности спектров поглощения хлорофиллов *a* и *b* позволяют определить их количество в экстракте без предварительного разделения. При определении содержания хлорофилла *a* и *b* использовали длины 662 нм и 644 нм, а для каротиноидов – 440,5 нм [1]. Полученные данные концентрации пигментов пересчитывали для 100% ацетона по уравнению Хольма-Ветштейна.

При помощи анализатора NIRS DS2500 (FOSS, Дания) осуществляли анализ исходного зерна (взятого для посева) и выращенного в климатической камере по вариантам опыта. Для определения биохимических показателей исходного материала были отобраны по 2 пробы зерна каждого варианта опыта, которые помещали в чашу для проб для измерения коэффициента отражения в 8 точках пробы. Калибровка прибора позволяет определить такие показатели, как влажность, белок, жир, клетчатка, зола, крахмал (%).

Всхожесть и энергию прорастания полученных семян и посевного материала определяли в соответствии с ГОСТ 12038-84 [2].

Эксперимент проводился в трех повторностях. Статистическую обработку экспериментальных данных производили с помощью MS Excel двухфакторным дисперсионным анализом с применением F-теста и критерия Тьюки при уровне вероятности  $P = 0,95$ .

### Результаты и их обсуждение

При анализе концентрации фотосинтетических пигментов растений пшеницы сорта Любава и ячменя сорта Прерия в фазе выхода в трубку (рис. 2) обнаружено, что пшеница при всех вариантах освещения содержала количественно больше фотосинтетических пигментов, при этом соотношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* находилось в пределах нормы для периода активной вегетации (около 3), а ячмень испытывал стресс от недостатка освещенности (соотношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* по вариантам опыта было в диапазоне 2,4–2,6).

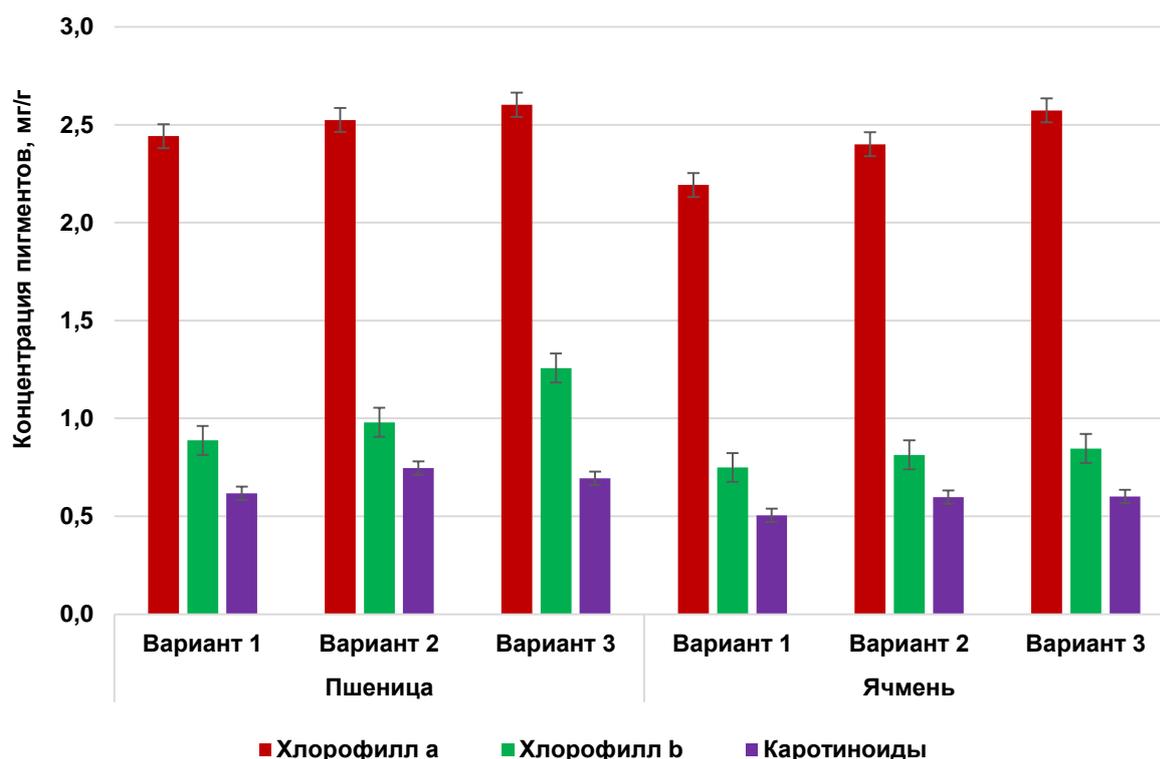


Рис. 2. Содержание основных пигментов в растениях пшеницы яровой сорта Любава и ячменя ярового сорта Прерия в фазе выхода в трубку

По отношению общего хлорофилла к каротиноидам можно сказать, что растения и пшеницы, и ячменя находились в периоде активного роста без проявления признаков старения. Для растений пшеницы не наблюдалось статистически достоверной разницы по содержанию фотосинтетических пигментов между вариантами освещения, а для ячменя можно отметить повышение содержания общего хлорофилла при освещении по варианту В2 (на 12–20% больше, чем в других вариантах).

В фазе колошения содержание общего хлорофилла в пшенице также было немного выше, однако отношение концентраций хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* значительно понизилось, особенно в вариантах В2 и В3 (соответственно 2,6 и 2,1), что существенно ниже, чем в фазе выхода в трубку. Обусловлено это тем, что высота и плотность зеленой массы растений увеличилась, в результате чего наблюдался недостаток освещенности средней и нижней части растений. Отношение общего хлорофилла к каротиноидам уменьшилось, что соответствует фазе развития (рис. 3).

Растения ячменя по высоте были существенно ниже растений пшеницы, поэтому отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* находилось в пределах допустимых значений для периода роста и плодоношения (3–4).

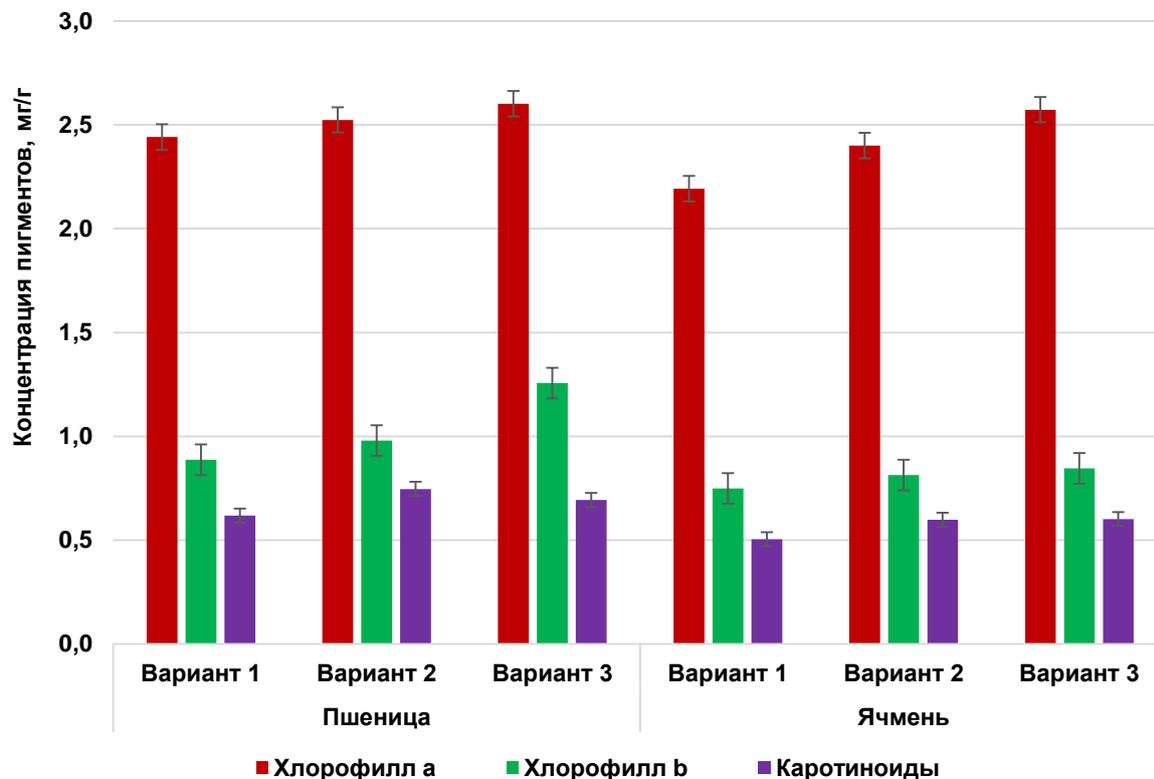


Рис. 3. Содержание основных пигментов в растениях пшеницы яровой сорта Любава и ячменя ярового сорта Прерия в фазе колошения

Таким образом, для растений пшеницы на начальном этапе роста до фазы колошения освещенности  $200 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  достаточно для активной работы фотосинтетического аппарата, а к фазе колошения необходимо увеличить интенсивность и равномерность освещения. Для растений ячменя, высота которых была существенно ниже, нехватка освещенности наблюдалась до фазы выхода в трубку, поэтому для данной культуры на этот период необходимо увеличивать интенсивность освещения, это достигается использованием осветителей с регулируемой интенсивностью освещения или изменением высоты расположения ламп (снижение высоты позволит увеличить интенсивность освещения на уровне поверхности листьев).

Максимальная концентрация пигментов растений пшеницы и ячменя наблюдается при освещении по варианту В3. В этом же варианте колошение началось на 5 дней раньше. Морфологические показатели растений приведены на рисунке 4.

Анализ диаграмм (рис. 4) показывает, что различный спектральный состав света достоверно повлиял на величину продуктивной кустистости растений ( $\text{НСР}_{05} = 0,35$ ) и среднее число зерен с растения ячменя ( $\text{НСР}_{05} = 5,5$ ), достоверного влияния на высоту растений пшеницы и ячменя, длину колоса, массу, количество и массу зерновок в колосе установлено не было. Показатель кустистости ячменя и пшеницы напрямую повлиял на выход зерен с единицы площади (рис. 5). Лучшим для ячменя оказалось освещение по варианту В3 с максимальной долей R-спектра, повышенным FR и умеренным G, а для пшеницы – освещение по варианту В2, с максимальным содержанием B и FR и минимальным G ( $\text{НСР}_{05} = 602,08$ ).

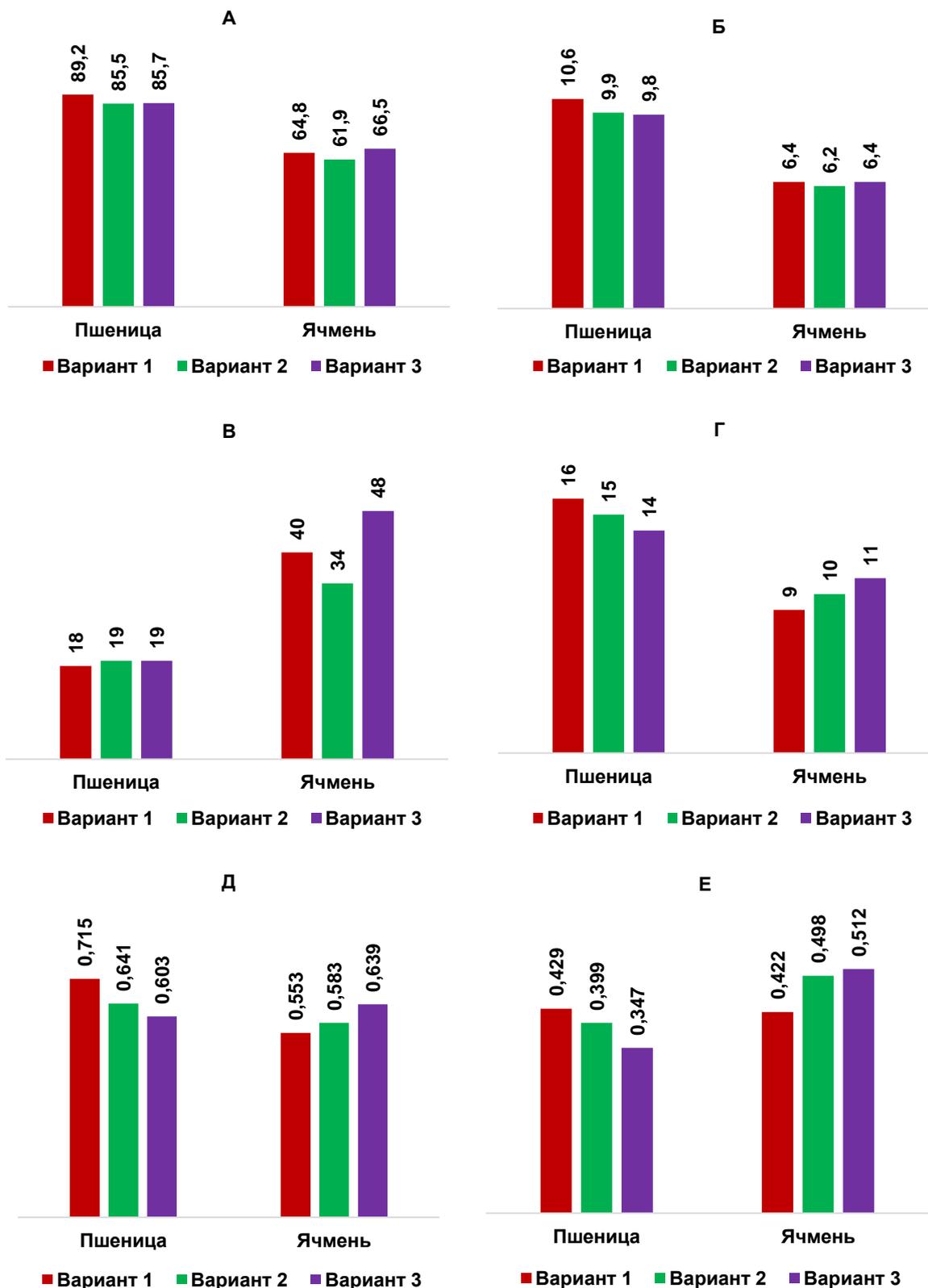


Рис. 4. Морфологические показатели пшеницы яровой сорта Любава и ячменя ярового сорта Прерия при освещении растений спектрами В1 (B15G40R40FR5), В2 (B22G11R49FR18), В3 (B16G18R51FR15): А – средняя высота растений, см; Б – средняя длина колоса, см; В – продуктивная кустистость растений, шт.; Г – среднее количество зерен в колосе, шт.; Д – средняя масса колоса, г; Е – средняя масса зерна в колосе, г

\*Буквы указывают на значительные различия между видами освещения в соответствии с критерием Дункана ( $p \leq 0,05$ )

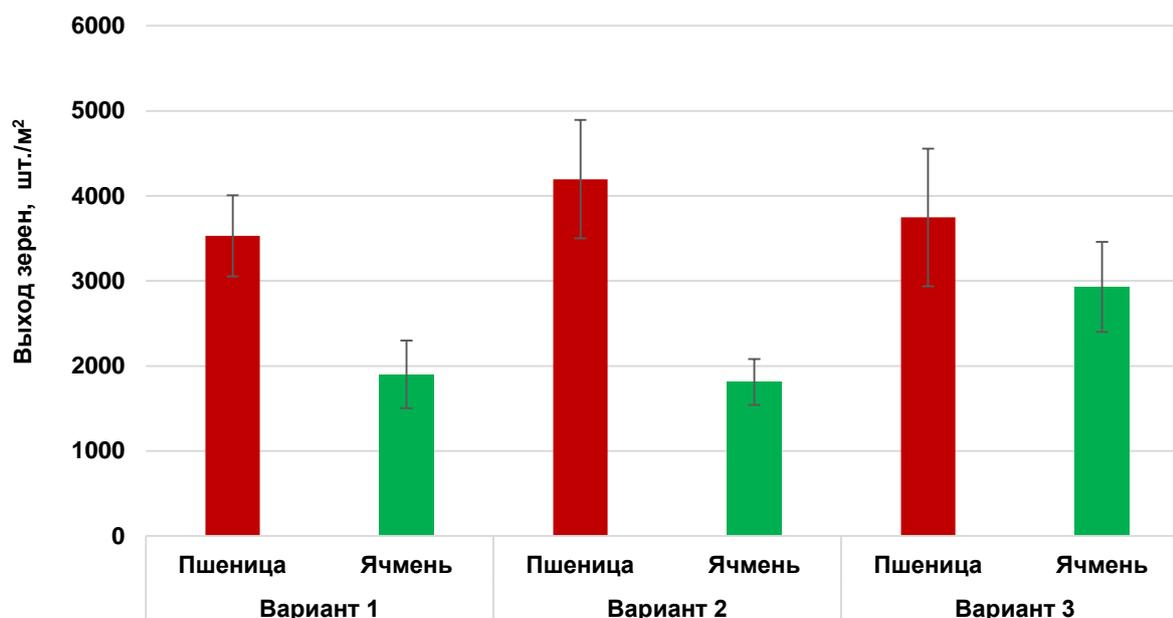


Рис. 5. Число зерен с 1 м<sup>2</sup> пшеницы сорта Любава и ячменя сорта Прерия при освещении растений спектрами по вариантам опыта В1 (B15G40R40FR5), В2 (B22G11R49FR18) и В3 (B16G18R51FR15)

Масса 1000 зерен пшеницы и ячменя была несколько ниже по сравнению со значениями, указанными в характеристиках данных сортов при выращивании в открытом грунте, что обусловлено различной интенсивностью облучения и условиями питания. Масса 1000 зерен пшеницы Любава составляла 28,4 (вариант В1), 26,2 (вариант В2) и 26,5 (вариант В3). Масса 1000 зерен ячменя Прерия составляла 41,5 (вариант В1), 43,7 (вариант В2) и 44,2 (вариант В3).

Биохимические показатели (NIRS DS2500) исходного зерна и зерна, полученного по вариантам опыта, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели влажности, белка, жира, клетчатки, золы, крахмала исходного посевного материала пшеницы яровой сорта Любава и ячменя ярового сорта Прерия и по вариантам опыта, %

Образцы семян	Белок	Влага	Жир	Клетчатка	Зола	Крахмал
Пшеница						
Посевной материал	16,1 ± 0,3d	10,5 ± 0,3a	1,5 ± 0,05b	2,5 ± 0,02a	1,7 ± 0,06a	57,8 ± 1,0d
В1	16,5 ± 0,9d	12,0 ± 0,7c	1,3 ± 0,10a	2,6 ± 0,02a	2,0 ± 0,09b	50,2 ± 1,4c
В2	16,3 ± 0,8d	12,2 ± 0,4c	1,4 ± 0,08ab	2,6 ± 0,04a	1,9 ± 0,05ab	51,5 ± 2,2c
В3	15,0 ± 0,7c	11,6 ± 0,4b	1,4 ± 0,09ab	2,6 ± 0,04a	1,9 ± 0,08ab	52,2 ± 1,2c
Ячмень						
Посевной материал	12,4 ± 0,4a	10,8 ± 0,2a	2,0 ± 0,18d	3,8 ± 0,30b	2,1 ± 0,06b	52,2 ± 1,1c
В1	14,6 ± 0,4b	12,6 ± 0,1c	1,7 ± 0,09c	4,3 ± 0,13c	2,8 ± 0,11d	41,0 ± 2,6ab
В2	12,4 ± 0,6a	13,6 ± 0,4d	1,6 ± 0,18b	4,9 ± 0,43d	2,6 ± 0,11c	38,9 ± 1,4a
В3	14,7 ± 0,5b	15,4 ± 0,2e	1,8 ± 0,05c	4,4 ± 0,17c	2,5 ± 0,10c	43,2 ± 2,4b

Значения представляют собой среднее ± SE (n = 12). Буквы указывают на значительные различия между видами освещения и биологическим видом в соответствии с критерием Дункана (p ≤ 0,05).

Содержание белка в зернах пшеницы соответствовало сортовым характеристикам варианта В3 и было выше значений вариантов В1 и В2 соответственно на 1,5 и 1,3%. Зерновки растений ячменя, выращенных при освещении по вариантам В1 и В3, соответствовали сортовым характеристикам по содержанию белка. При освещении по варианту В2 накопление белка было существенно меньше. Характерных для листьев проростков закономерностей в накоплении углеводов под большим R-облучением и белков под В-облучением [1, 7] в зерновках не наблюдалось.

Была проверена всхожесть пшеницы и ячменя. В соответствии с ГОСТ 52325-2005 «Сортовые и посевные качества семян зерновых и зернобобовых растений» всхожесть пшеницы и ячменя должна составлять не менее 92% [3].

Все варианты освещения, используемые в опыте, пригодны для получения семян пшеницы с кондиционной всхожестью (95,7–97,7%).

Как следует из данных, приведенных в таблице 2, лучшим для пшеницы вариантом освещения был В2 (В22G11R49FR18) с наибольшей долей В и FR. Освещение по вариантам В2 и В3 подходит для получения семян ячменя надлежащей всхожести (92–93%). При освещении по варианту В2 всхожесть оказалась меньше надлежащей, что может быть связано с ингибирующим действием FR [18]. Лучшим вариантом освещения для ячменя был вариант В3 (В16G18R51FR15).

**Таблица 2. Энергия прорастания и всхожесть исходного посевного материала и полученного в результате опыта зерна пшеницы сорта Любава и ячменя сорта Прерия по 3 вариантам освещения**

Культура	Варианты опыта	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %
Пшеница, сорт Любава	Посевной материал	46,0	53,0
	В1	84,0	96,0
	В2	76,0	97,7
	В3	82,0	95,7
Ячмень, сорт Прерия	Посевной материал	93	95
	В1	87	93
	В2	80	88
	В3	84	92

Таким образом, экспериментальным путем подтверждено, что растения пшеницы более толерантны, а растения ячменя более чувствительны к изменению спектрального состава освещения (интенсивности освещения), что подтверждается данными других исследователей [19].

Посевной материал, полученный в полной светокультуре, соответствует стандартам, поэтому все изученные варианты спектров подходят для ускоренной селекции пшеницы в климатических камерах. Для ячменя оптимальным вариантом освещения по комплексу показателей был В3 (В16G18R51FR15).

### **Выводы**

1. При освещении по всем вариантам концентрация фотосинтетических пигментов в растениях пшеницы сорта Любава в фазе выхода в трубку была выше, чем в растениях ячменя сорта Прерия. При этом в растениях пшеницы отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* находилось в пределах нормы для периода активной вегетации, а растения ячменя испытывали стресс из-за использования недостаточно интенсивного освещения.

2. Содержание общего хлорофилла в растениях пшеницы в фазе колошения было выше, чем в растениях ячменя, однако отношение концентрации хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* существенно понизилось, особенно при использовании освещения по вариантам В2 и В3 – соответственно на 2,6 и 2,1.

3. Все варианты освещения, использованные в опыте, пригодны для получения семян пшеницы с кондиционной всхожестью (на уровне 95,7–97,7%). Лучшим для пшеницы сорта Любава было освещение по варианту В2 (В22G11R49FR18) с наибольшей долей синего и дальнего красного облучения.

Варианты освещения В1 и В2 можно рекомендовать для получения семян ячменя, отличающихся высокой всхожестью (на уровне 92–93%).

Оптимальным для ячменя сорта Прерия было освещение по варианту В3 (В16G18R51FR15) с максимальной долей R-спектра, повышенным FR и умеренным G.

---

**Список источников**

1. Азизов И.В., Гасымова Ф.И., Ибрагимова У.Ф. и др. Влияние синего и красного света на физиологические и биохимические характеристики растений пшеницы // SCIENCES OF EUROPE. GLOBAL SCIENCE CENTER LP. 2019. № 41-1(41). С. 3–6.
2. ГОСТ Р 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Москва: Стандартинформ, 2011. 29 с.
3. ГОСТ Р 52325-2005. Семена сельскохозяйственных растений. Сортные и посевные качества. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2006. 38 с.
4. Драгавцев В.А. Решения технологических задач селекционного повышения урожаев, вытекающие из Теории эколого-генетической организации количественных признаков // Восточно-европейский научный журнал. 2019. № 2(42). С. 11–26.
5. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45106> (дата обращения: 16.05.2023).
6. Тертышная Ю.В., Левина Н.С. Влияние спектрального состава света на развитие сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 5. С. 24–29. DOI: 10.22314/207375992016.5.2429.
7. Чернов К.В., Тляумбетов И.А. Воздействие синего и красного света на листья пшеницы // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сборник статей IX Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Пензенского государственного аграрного университета (Пенза, 12–13 марта 2021 г.). Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. С. 193–196.
8. Averdecheva O., Berkovich Yu.A., Smolyanina S. et al. Biochemical, photosynthetic and productive parameters of Chinese cabbage grown under blue-red LED assembly designed for space agriculture // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53(11). Pp. 1574–1581.
9. Goins G.D., Yorio N.C., Sanwo M.M. et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting // Journal of Experimental Botany. 1997. Vol. 48(312). Pp. 1407–1413. DOI: 10.1093/jxb/48.7.1407.
10. Kamal K.Y., Khodaeiaminjan M., El-Tantawy A.A. Evaluation of growth and nutritional value of Brassica microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations // Physiologia Plantarum. 2020. Vol. 169(4). Pp. 625–638.
11. Kasajima S.Y., Inoue N., Mahmud R. et al. Developmental responses of wheat cv. Norin 61 to fluence rate of green light // Plant Production Science. 2008. Vol. 11(1). Pp. 76–81. DOI: [org/10.1626/pps.11.76](https://doi.org/10.1626/pps.11.76).
12. Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C. et al. A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs // Acta Horticulturae. 2004. Vol. 659. Pp. 467–475. DOI: 10.17660/actahortic.2004.659.
13. Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C. et al. 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. 2006. Vol. 711. Pp. 111–120. DOI: 10.17660/actahortic.2006.711.
14. Li L., Tong Y.X., Lu J.L. et al. Lettuce growth, nutritional quality, and energy use efficiency as affected by red-blue light combined with different monochromatic wavelengths // Hortscience. 2020. Vol. 55(5). Pp. 613–620.

15. Liu M.X., Xu Z.G., Yang Y. et al. Effects of different spectral lights on *Oncidium* PLBs induction, proliferation, and plant regeneration // *Plant Cell Tissue and Organ Culture*. 2011. Vol. 106(1). Pp. 1–10.
16. Meng Q., Kelly N., Runkle E.S. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale // *Environmental and Experimental Botany*. 2019. Vol. 162(10). Pp. 383–391. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.03.
17. Mitchell C.A., Dzakovich M.P., Gomez C. et al. Light-emitting diodes in horticulture // In Book *Horticultural Reviews*. 2015. Edition: 43 Chapter: 1. Publisher: John Wiley and Sons, Inc. Editors: Jules Janick. Pp. 1–88. DOI: 10.1002/9781119107781.ch01.
18. Panda D., Mohanty S., Das S. et al. The role of phytochrome-mediated gibberellic acid signaling in the modulation of seed germination under low light stress in rice (*O. sativa* L.) // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2022. Vol. 28(3). Pp. 585–605. DOI: 10.1007/s12298-022-01167-7.
19. Stefański P., Matysik P., Siedlarz-Słowacka P. et al. Efficiency of LED lamps used in cereal crop breeding greenhouses // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2022. Vol. 15(2). Pp. 75–83. DOI: 10.25165/ijabe.20221502.5775.
20. Stefański P., Matysik P., Siedlarz P. et al. Usefulness of LED lightings in cereal breeding on example of wheat, barley and oat seedlings // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019. Vol. 12(6). Pp. 32–37. DOI: 10.25165/ijabe.20191205.3646.

## References

1. Azizov I.V., Gasymova F.I., Ibragimova U.F. et al. Vliyanie sinego i krasnogo sveta na fiziologicheskie i biokhimicheskie kharakteristiki rastenij pshenitsy [Influence of blue and red light on physiological and biochemical characteristics of wheat plants]. *SCIENCES OF EUROPE. GLOBAL SCIENCE CENTER LP*. 2019;41-1(41):3-6. (In Russ.).
2. GOST R 12038-84. Semena sel'skokhozyajstvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti [Agricultural seeds. Methods for determination of germination]. Moscow: Standartinform Publishing House; 2011. 29 p. (In Russ.).
3. GOST R 52325-2005. Semena sel'skokhozyajstvennykh rastenij. Sortovye i posevnye kachestva. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Seeds of agricultural plants. Varietal and sowing characteristics. General specifications]. Moscow: Standartinform Publishing House; 2006. 38 p. (In Russ.).
4. Dragavtsev V.A. Resheniya tekhnologicheskikh zadach selektsionnogo povysheniya urozhav, vytekayushchie iz Teorii ekologo-geneticheskoy organizatsii kolichestvennykh priznakov [Solutions of technological problems of selective increase of crop yields arising from the Theory of ecological and genetic organization of quantitative phenotype traits]. *Vostochno-evropejskij nauchnyj zhurnal = East European Scientific Journal*. 2019;2(42):11-26. (In Russ.).
5. Ob utverzhenii Doktriny prodovol'stvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federatsii: Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federatsii ot 21 yanvarya 2020 g. № 20 [On the approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 20 of January 21, 2020]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45106>. (In Russ.).
6. Tertyshnaya Yu.V., Levina N.S. Vliyanie spektral'nogo sostava sveta na razvitie sel'skokhozyajstvennykh kul'tur [Effect of light spectrum on the development of agricultural crops]. *Sel'skokhozyajstvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2016;5:24-29. (In Russ.).
7. Chernov K.V., Tlyaumbetov I.A. Vozdejstvie sinego i krasnogo sveta na list'ya pshenitsy. Innovatsionnye tekhnologii v APK: teoriya i praktika: sbornik statej IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoj 70-letiyu Penzenskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Penza, 12-13 marta 2021 g.) [Impact of blue and red light on wheat leaves. Innovative technologies in Agro-Industrial Complex: Theory and Practice: Collection of Scientific Papers of the IX International Research-to-Practice Conference dedicated to the 70<sup>th</sup> Anniversary of Penza State Agrarian University (Penza, March 12-13, 2021)]. Penza: Penza State Agrarian University Press; 2021:193-196. (In Russ.).
8. Avercheva O., Berkovich Yu.A., Smolyanina S. et al. Biochemical, photosynthetic and productive parameters of Chinese cabbage grown under blue-red LED assembly designed for space agriculture. *Advances in Space Research*. 2014;53(11):1574-1581.
9. Goins G.D., Yorio N.C., Sanwo M.M. et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *Journal of Experimental Botany*. 1997;48(312):1407-1413. DOI: 10.1093/jxb/48.7.1407.
10. Kamal K.Y., Khodaieaminjan M., El-Tantawy A.A. Evaluation of growth and nutritional value of Brassica microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations. *Physiologia Plantarum*. 2020;169(4):625-638.
11. Kasajima S.Y., Inoue N., Mahmud R. et al. Developmental responses of wheat cv. Norin 61 to fluence rate of green light. *Plant Production Science*. 2008;11(1):76-81. DOI: org/10.1626/pp.11.76.
12. Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C. et al. A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs. *Acta Horticulturae*. 2004;659:467-475. DOI: 10.17660/actahortic.2004.659.

13. Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C. et al. 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*. 2006;711:111-120. DOI: 10.17660/actahortic.2006.711.
14. Li L., Tong Y.X., Lu J.L. et al. Lettuce growth, nutritional quality, and energy use efficiency as affected by red-blue light combined with different monochromatic wavelengths. *Hortscience*. 2020;55(5):613-620.
15. Liu M.X., Xu Z.G., Yang Y. et al. Effects of different spectral lights on *Oncidium* PLBs induction, proliferation, and plant regeneration. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*. 2011;106(1):1-10.
16. Meng Q., Kelly N., Runkle E.S. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;162(10):383-391. DOI: 10.1016/j.envexbot.2019.03.
17. Mitchell C.A., Dzakovich M.P., Gomez C. et al. Light-emitting diodes in horticulture. In Book *Horticultural Reviews*. 2015. Edition: 43 Chapter: 1. Publisher: John Wiley and Sons, Inc. Editors: Jules Janick. Pp. 1–88. DOI: 10.1002/9781119107781.ch01.
18. Panda D., Mohanty S., Das S. et al. The role of phytochrome-mediated gibberellic acid signaling in the modulation of seed germination under low light stress in rice (*O. sativa* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2022;28(3):585-605. DOI: 10.1007/s12298-022-01167-7.
19. Stefański P., Matysik P., Siedlarz-Słowacka P. et al. Efficiency of LED lamps used in cereal crop breeding greenhouses. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2022;15(2):75-83. DOI: 10.25165/j.ijabe.20221502.5775.
20. Stefański P., Matysik P., Siedlarz P. et al. Usefulness of LED lightings in cereal breeding on example of wheat, barley and oat seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019;12(6):32-37. DOI: 10.25165/j.ijabe.20191205.3646.

#### **Информация об авторах**

А.С. Дорохов – академик РАН, профессор, доктор технических наук, заместитель директора по научно-организационной работе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», dorokhov.vim@yandex.ru.

В.В. Пыльнев – профессор, доктор биологических наук, зав. кафедрой генетики, селекции и семеноводства ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», pyl8@yandex.ru.

Н.А. Семенова – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», natalia.86@inbox.ru.

М.С. Широкова – лаборант-исследователь лаборатории исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», m\_shirokova98@mail.ru.

Н.О. Чилингарян – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных роботизированных средств и климатического оборудования для закрытых экосистем ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», narek-s@list.ru.

#### **Information about the authors**

A.S. Dorokhov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, dorokhov.vim@yandex.ru.

V.V. Pylynev, Professor, Doctor of Biological Sciences, Head of the Dept. of Genetics, Breeding and Seed Production, Russian Timiryazev State Agrarian University, pyl8@yandex.ru.

N.A. Semenova, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Research Scientist, Technological Properties of Agricultural Materials Research Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, natalia.86@inbox.ru.

M.S. Shirokova, Research Laboratory Assistant, Technological Properties of Agricultural Materials Research Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, m\_shirokova98@mail.ru.

N.O. Chilingaryan, Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Scientist, Laboratory of Intelligent Robotic Tools and Climate Control Equipment for Closed Ecosystems, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, narek-s@list.ru.

**Статья поступила в редакцию 24.08.2023; одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 26.09.2023.**

**The article was submitted 24.08.2023; approved after reviewing 25.09.2023; accepted for publication 26.09.2023.**

© Дорохов А.С., Пыльнев В.В., Семенова Н.А., Широкова М.С., Чилингарян Н.О., 2023

---

---