

doi 10.18699/vjgb-25-96

Увеличение доли дальнего красного света сокращает вегетационный период тритикале в условиях спидбридинга

А.О. Блинков , В.М. Нагамова , Я.В. Минькова , Н.Ю. Свистунова , С. Радзениеце , А.А. Кочешкова ,
Н.Н. Слепцов ^{1, 2}, А.В. Фрейманс³, В.В. Панченко⁴, А.Г. Черноок , Г.И. Карлов , М.Г. Дивашук 

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия

² Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

³ ООО «Климбиотех», Москва, Россия

⁴ Национальный центр зерна им. П.П. Лукьяненко, Краснодар, Россия

 aoblinkov@gmail.com

Аннотация. Работа по созданию нового перспективного сорта занимает в среднем 12–15 лет. Одним из возможных решений проблемы сокращения длительности селекционного процесса становится технология спидбридинг (speed breeding). Метод, направленный на сокращение вегетационного периода, позволяет получать до шести последовательных поколений яровых злаков за один год. К сожалению, в протоколах спидбридинга уделено мало внимания дальнему красному свету – широко известному индуктору быстрого перехода к цветению. В нашей работе мы оценили возможность использования дальнего красного света для оптимизации спидбридинга яровой тритикале. Экспериментальные растения выращивали в трех вариантах освещения, различающихся соотношением уровней излучения в области 660 нм (К – красный) и 730 нм (ДК – дальний красный): 1) К/ДК 3.75 (К > ДК); 2) К/ДК 0.8 (К = ДК) и 3) К/ДК 0.3 (К < ДК). В результате установлено, что начало цветения тритикале наступало значительно раньше при самом низком соотношении красного к дальнему красному свету (К/ДК 0.3). В среднем при К/ДК 0.3 растения, вегетирующие на минеральной вате и почвенной смеси, зацветали соответственно на 2.6 и 4.1 суток быстрее, чем при варианте К/ДК 3.75. Статистически значимой разницы по продолжительности периода от посева до цветения между вариантами К/ДК 3.75 и К/ДК 0.8 не выявлено. Показано негативное влияние увеличенной доли дальнего красного света на репродуктивную систему тритикале. У семян, сформировавшихся при К/ДК 0.3, наблюдалась значительно меньшая энергия прорастания и всхожесть. Различий в регенерационных способностях изолированных *in vitro* зародышей, полученных от тритикале, выросшей под светом с разным спектральным составом, не обнаружено. Полученные нами результаты демонстрируют, что для сокращения времени от посева до цветения тритикале важно не только наличие дальнего красного света, но и его соотношение с красным, а именно использование состава, близкого к соотношению К/ДК 0.3. Модифицированный по спектральному составу света протокол спидбридинга позволил инициировать цветение уже на 33.9 ± 1.2 сутки с момента посева. Аналогичный сорт тритикале в полевых условиях Краснодарского края и классических лабораторных условиях выращивания с фотопериодом 18/6 ч день/ночь зацвел на 25–29 суток позже, чем в условиях спидбридинга.

Ключевые слова: дальний красный свет; красный свет; спидбридинг; тритикале

Для цитирования: Блинков А.О., Нагамова В.М., Минькова Я.В., Свистунова Н.Ю., Радзениеце С., Кочешкова А.А., Слепцов Н.Н., Фрейманс А.В., Панченко В.В., Черноок А.Г., Карлов Г.И., Дивашук М.Г. Увеличение доли дальнего красного света сокращает вегетационный период тритикале в условиях спидбридинга. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025;29(6):896-904. doi 10.18699/vjgb-25-96

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FGUM-2024-0002.

A higher far-red intensity promotes the transition to flowering in triticale grown under speed breeding conditions

A.O. Blinkov , V.M. Nagamova , Y.V. Minkova , N.Yu. Svistunova , S. Radzeniece , A.A. Kocheshkova ,
N.N. Sleptsov ^{1, 2}, A.V. Freymans³, V.V. Panchenko⁴, A.G. Chernook , G.I. Karlov , M.G. Divashuk 

¹ All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

³ LLC "Climbiotech", Moscow, Russia

⁴ National Center of Grain named after P.P. Lukyanenko, Krasnodar, Russia

 aoblinkov@gmail.com

Abstract. It typically takes 12 to 15 years to develop a new promising variety. One of the ways to reduce this time is through speed breeding. This method allows for up to six consecutive generations of spring cereals in a single year. Although far-red light is often overlooked in speed breeding protocols, it serves as a potent inducer of accelerated flower-

ing in various plant species. In this study, we explored the advantages of far-red light as a means to optimize the speed breeding of spring triticale. Experimental plants were cultivated under three conditions with different red to far-red ratios at 660 nm (R – red) and 730 nm (FR – far red): 1) 3.75 (R > FR); 2) 0.8 (R = FR) and 3) 0.3 (R < FR). We found that the onset of triticale flowering occurred significantly earlier at the lowest red to far-red light ratio (R/FR 0.3). On average, plants bloomed 2.6 and 4.1 days earlier in a mineral wool and a soil mixture at R/FR 0.3, respectively, than those grown at R/FR 3.75. A negative effect of higher-intensity far-red light on the reproductive system of triticale was observed. Additionally, seeds obtained from plants grown under higher-intensity far-red light showed significantly lower germination energy and capacity. No differences were found in the regenerative capacity of isolated embryos *in vitro* obtained from plants grown under the different spectral compositions. Our results demonstrate that the accelerated triticale development requires not only the involvement of far-red light, but also a specific red to far-red light ratio close to 0.3. A modified speed breeding protocol relying on this ratio enabled flowering to commence as early as 33.9 ± 1.2 days after sowing. The same triticale variety grown under field conditions in the Krasnodar region and in traditional laboratory growing conditions with a photoperiod of 18/6 h day/night flowered 25 to 29 days later than those cultivated under the speed breeding conditions.

Key words: far-red light; red light; speed breeding; triticale

For citation: Blinkov A.O., Nagamova V.M., Minkova Y.V., Svistunova N.Yu., Radzeniece S., Kocheshkova A.A., Sleptsov N.N., Freymans A.V., Panchenko V.V., Chernook A.G., Karlov G.I., Divashuk M.G. A higher far-red intensity promotes the transition to flowering in triticale grown under speed breeding conditions. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov J Genet Breed*. 2025;29(6):896-904. doi 10.18699/vjgb-25-96

Введение

Селекционеры и генетики всегда стремились к более быстрому получению гомозиготных линий злаков с заданными свойствами, в связи с чем в практику вошли такие подходы, как челночная селекция (Mergoum et al., 2009), получение удвоенных гаплоидов (Тимонова и др., 2022), использование эмбриокультуры (Liu et al., 2016) и молекулярных маркеров (Fedyaeva et al., 2023). Однако эти методы не всегда доступны для конкретной лаборатории или селекционного центра, могут требовать использования высококвалифицированного персонала, ряд из них не приводит к желаемому сокращению сроков создания чистых линий.

В последние годы набирает популярность спидбридинг (speed breeding) – метод, основанный на сокращении вегетационного периода растений до двух месяцев (Ghosh et al., 2018; Watson et al., 2018). За счет сокращения вегетационного периода одного поколения спидбридинг позволяет получать до шести последовательных поколений яровых злаков за 12 месяцев, другими словами, чистые линии за один год. Суть спидбридинга заключается в использовании физических факторов, влияющих на сокращение времени от посева до цветения, уменьшение продолжительности генеративной стадии развития и преодоление послеуборочного покоя и тем самым минимизации времени на выращивание одного поколения. Технология проста, мало затратна и позволяет работать с генотипами, адаптированными к разным природно-климатическим зонам, что способствует ее активному внедрению в различные селекционные и исследовательские программы (Hickey et al., 2017; Li et al., 2019; Vikas et al., 2021).

Для сокращения времени от посева до цветения злаков используют длительный фотопериод, спектральный состав света, включающий участок видимого светового излучения в диапазоне 400–700 нм и интенсивность света, равную 450–500 мкмоль/(м²·с) (Watson et al., 2018), ограниченную площадь питания (Zheng et al., 2023), строгий контроль температуры (Ficht et al., 2023), высокие концентрации CO₂ и удаление побегов кушения (Tanaka et al., 2016). Для сокращения периода созревания прово-

дят принудительное высушивание незрелых семян с последующим преодолением у них послеуборочного покоя (Marenkova et al., 2024) или используют эмбриокультуру (Zheng et al., 2023). Однако существуют параметры, роль которых в сокращении вегетационного периода растений пока не совсем ясна. К одним из них относится наличие дальнего красного света в период выращивания.

Дальний красный (ДК) свет (730 нм) считается сильным индуктором фотоморфогенеза. В зависимости от соотношения ДК с красным (К) светом (660 нм) он по-разному влияет на прорастание семян, удлинение побегов, рост листовой пластины, кушение, а также на сокращение времени от посева до зацветания (Rajcan et al., 2004; Ugarte et al., 2010; Kegge et al., 2015; Demotes-Mainard et al., 2016). Световое излучение на таких длинах волн и их соотношение друг с другом (принято описывать как К/ДК) дают определенный сигнал для растений, который воспринимается семейством фоторецепторов фитохромов. У однодольных фитохромы представлены тремя рецепторами: *PhyA*, *PhyB* и *PhyC* (Demotes-Mainard et al., 2016; Kippes et al., 2020). Дальний красный может быть в меньшем (К/ДК > 1), большем (К/ДК < 1) и равном соотношении (К/ДК = 1) с красным светом. Дневной свет содержит примерно равные пропорции красного и дальнего красного света (1.0–1.3). Это соотношение уменьшается до ≈ 0.6 во время рассветов и закатов. Низкое соотношение красного света к дальнему красному также под навесом листьев и в пологе леса, что связано с активным поглощением красного света фотосинтетическими пигментами и отражением дальнего красного света от листьев. В данном случае низкое соотношение К/ДК как индикатор близости конкурирующих соседей инициирует синдром избегания тени, который проявляется в усиленном росте в длину, переориентации листьев в условия лучшей освещенности, а также ускоренной индукции зацветания, что увеличивает выживаемость растений (Demotes-Mainard et al., 2016; Smith, 2000).

В лабораторных условиях наибольшее влияние на рост и развитие злаков оказывает соотношение, при котором дальний красный преобладает над красным светом

(К/ДК < 1). При свете с таким спектральным составом значительно сокращается время от посева до цветения и уменьшается рост побегов кушения (Davis, Simmons, 1994; Ugarte et al., 2010; Toyota et al., 2014; Lei et al., 2022). Однако, несмотря на ряд положительных для спидбридинга возможностей, которые может дать дальний красный свет, увеличение его доли способствует уменьшению фертильных цветков, а также озерненности колоса (Ugarte et al., 2010; Drecer et al., 2022).

В протоколах спидбридинга культурных злаков использованию дальнего красного света уделено мало внимания: на графиках спектрального состава света исследовательских работ можно наблюдать как полное его отсутствие (Watson et al., 2018; Ficht et al., 2023), так и его различные соотношения с красным светом, в котором последний значительно преобладает (Ghosh et al., 2018; Watson et al., 2018; Cha et al., 2022). Лишь в немногих работах дальний красный свет подключен в равном соотношении с красным (Zakieh et al., 2021).

Существует ряд публикаций о влиянии дальнего красного на пшеницу (Toyota et al., 2014; Drecer et al., 2022; Lei et al., 2024), ячмень (Deitzer et al., 1979; Davis, Simmons, 1994; Kegge et al., 2015) и другие злаки (Rajcan et al., 2004; Markham et al., 2010; Huber et al., 2024). По тритикале этой теме уделено мало внимания, и подобные исследования практически не проводились (Kalituho et al., 1997). Аналогичная ситуация и с работами по спидбридингу: в открытом доступе можно найти лишь единичные работы для яровой (Cha et al., 2021) и озимой (Zheng et al., 2023) тритикале. В связи с этим цель нашей работы – оценка влияния дальнего красного света и его соотношения с красным светом в условиях спидбридинга на сокращение вегетационного периода, структуру урожая и репродуктивную систему тритикале.

Материалы и методы

Используемый растительный материал и условия выращивания. Объектом исследования служил сорт яровой тритикале (*×Triticosecale* Wittm.) Дублет (Danko Nowdowla Roślin, Польша). Сорт относится к наиболее скороспелым среди сортов яровой тритикале (Losert et al., 2017), поэтому данные, полученные на этом сорте, возможно использовать в качестве показателя минимума времени, затрачиваемого на полный цикл вегетации в условиях спидбридинга у тритикале. Дублет – удвоенный гаплоид (Arseniuk, 2019), он хорошо выровнен по наступлению фаз развития и морфологическим показателям. Сорт широко распространен в Европе (Леконцева и др., 2019; Радивон, Жуковский, 2023; Faccini et al., 2023) и известен каждому специалисту в области селекции зерновых культур.

Протравленные препаратом Максим (Syngenta, Франция) семена предварительно проращивали на смоченной водой фильтровальной бумаге в темноте при температуре +25 °С. Через сутки переносили в субстрат исключительно проросшие семена. Для выращивания использовали кассеты с объемом ячеек 110 мл. В качестве субстрата использовали: 1) почвенную смесь, состоящую из торфа, чернозема, песка и вермикулита в соотношении 5:3:1:1 (50 г увлажненной смеси на одну ячейку кассеты); 2) кубики минеральной ваты размером 50 × 45 × 45 мм (один

кубик на одну ячейку кассеты). В каждую ячейку кассеты помещали по одному проросшему семени на глубину 1 см. В помещениях с растениями поддерживали температуру +25–26 °С круглосуточно, влажность воздуха 35–45 %.

Первые две недели растения в почвенной смеси поливали по мере необходимости, подкормки проводили 1 раз в неделю удобрением Tripart (General Hydroponics Europe, Франция) согласно инструкции производителя, через 2 недели с момента посева растения переводили на полив удобрением 3 раза в неделю. Кубики минеральной ваты проливали удобрением ежедневно. Раз в неделю производили внекорневую подкормку препаратом Силиплант (Nest-M, Россия) согласно рекомендациям производителя. Обработки от болезней и вредителей проводили по мере необходимости. В период вегетации срезали дополнительные побеги кушения. Фотопериод поддерживали продолжительностью 22/2 ч день/ночь (Watson et al., 2018). Для освещения использовали регулируемые мультиспектральные ШИМ диммируемые LED-лампы (Prometheus VNIISB by Gorshkoff, Россия), чип-излучатели 460, 660, 735 нм, white4000K (EPIstar, Китай); контроллер широтно-импульсной модуляции многоканальный (БКД, Россия); общая мощность 800 ватт.

В качестве контрольных условий тритикале выращивали в климатической камере Fitotron SGC 120 (Weiss Technik, Нидерланды) с люминесцентными лампами при фотопериоде 18/6 ч день/ночь и интенсивности света 285 мкмоль/(м² · с) на уровне стеллажа, температуре +22 °С и влажности воздуха 65 % круглосуточно. Посев и уход за растениями был аналогичным, как описано выше. В качестве дополнительного контроля использовали данные многолетних полевых испытаний Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко (Краснодарский край, Россия). Агротехника и сроки высева общепринятые для региона.

Влияние дальнего красного света на период вегетации и структуру урожая. Степень влияния дальнего красного света на тритикале определяли путем культивирования растений при трех вариантах освещения, различающихся соотношением уровней излучения в области 660 нм (К – красный) и 730 нм (ДК – дальний красный): 1) К/ДК 3.75 (К > ДК) (рис. 1, а); 2) К/ДК 0.8 (К = ДК) (см. рис. 1, б); 3) К/ДК 0.3 (К < ДК) (см. рис. 1, в).

Интенсивность освещения во всех вариантах выставляли равной 330 мкмоль/(м² · с) на уровне стеллажа. Дальний красный подключали через одну неделю с момента прорастания семян. Параметры освещения настраивали и проверяли с использованием спектрометра PG200N (United Power Research Technology Corp., Тайвань).

Наступление фенологических фаз оценивали индивидуально у каждого растения согласно (Zadoks et al., 1974). Наступлением фазы колошения был день, когда колос полностью выходил из влагалища флагового листа (фаза Z5.9). Наступлением фазы цветения считали день, в который у колосьев появлялись первые пыльники (фаза Z6.1).

Для оценки влияния дальнего красного света на тритикале проводили структурный анализ всех экспериментальных растений по основным показателям: высота растений (см), длина колоса (см), вегетативная масса колоса и соломины (г), число колосков (шт.) и зерен (шт.) на колос, число зерен на колосок (шт.), а также масса 1000 зерен (г).

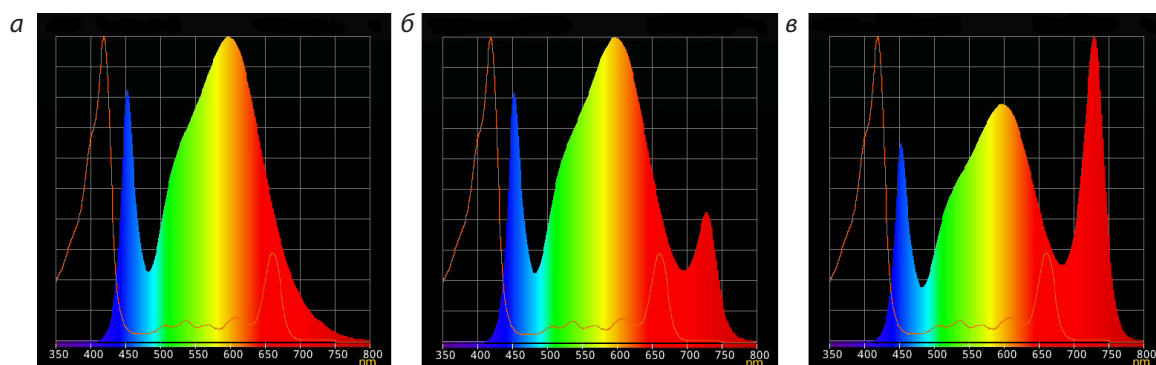


Рис. 1. Спектральный состав света, используемый в эксперименте: а – $K > ДК$, $K/ДК$ 3.75; б – $K = ДК$, $K/ДК$ 0.8; в – $K < ДК$, $K/ДК$ 0.3.

Влияние дальнего красного света на жизнеспособность семян. Влияние дальнего красного света на жизнеспособность семян оценивали двумя способами: 1) путем культивирования незрелых зародышей; и 2) проращиванием семян на фильтровальной бумаге. В первом подходе зародыши изолировали на 15-е сутки после цветения. Зерновки стерилизовали в 50 % растворе коммерческого средства «Белизна», после чего три раза промывали стерильной дистиллированной водой. Изолирование зародышей проводили под стереоскопическим микроскопом Olympus SZ61 (Olympus, Япония). Культивировали в чашках Петри, содержащих агаризованную среду Мурашиге–Скуга (Murashige, Skoog, 1962), в течение 10 суток при фотопериоде 22 ч день / 2 ч ночь, интенсивности света равной $80 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и температуре $+24^\circ \text{C}$.

Во втором подходе начиная с 17-х суток с момента цветения плавно сокращали количество полива до его полного прекращения в день срезки колосьев, на 20-е сутки после цветения. Срезанные колосья помещали в бумажные пакеты, которые подвергали принудительному высушиванию при температуре $+28^\circ \text{C}$ в течение 7–10 суток в зависимости от скорости высыхания. После сушки колосья обмолачивали и семена хранили в бумажных пакетах при комнатной температуре в течение одной недели. Далее семена помещали в чашки Петри на фильтровальную бумагу, смоченную 0.5 мг/л раствора гибберелловой кислоты (Sigma-Aldrich, США) и инкубировали в условиях холодной предобработки ($+4^\circ \text{C}$, темнота, трое суток) с последующим проращиванием в темноте при $+25^\circ \text{C}$. Энергию прорастания оценивали на третьи сутки, а всхожесть на седьмые сутки после помещения чашек Петри с семенами на $+25^\circ \text{C}$.

Статистическая обработка результатов. Для оценки степени влияния спектрального состава света на период вегетации тритикале использовали двукратную повторность на каждый вариант, по 10 растений в каждой повторности. Итого анализировали 120 растений. Оценивали количество дней от посева до цветения каждого индивидуального растения. В полевых условиях оценивали количество дней от посева до массового цветения.

Для оценки регенерационной способности и жизнеспособности изолированных зародышей использовали четырехкратную повторность по 10 изолированных зародышей в каждой. Оценку энергии прорастания и всхожести семян

проводили в четырехкратной повторности. В каждой повторности было по 50 семян.

Статистическую обработку осуществляли с использованием языка программирования R (версия 4.3.2). Влияние спектрального состава света на показатели растений тритикале оценивали с использованием однофакторного дисперсионного анализа, после чего проводили множественные сравнения средних значений с использованием критерия Тьюки для определения значимых различий между группами растений.

Результаты

Влияние дальнего красного света на сроки цветения тритикале

Однофакторный дисперсионный анализ результатов проведенного эксперимента показал статистически значимое сокращение времени от посева до начала цветения у растений, культивированных под светом со спектральным составом, где $K/ДК$ 0.3, по сравнению с другими вариантами освещенности ($p < 0.05$). Такая тенденция наблюдалась на обоих вариантах субстратов. Растения под светом со спектральным составом $K/ДК$ 0.3 зацветали в среднем на 2.6 и 4.1 суток быстрее при использовании минеральной ваты и почвенной смеси соответственно, чем под светом со спектральным составом, где $K/ДК$ 3.75. Статистически значимой разницы по продолжительности периода от посева до цветения между вариантами $K/ДК$ 3.75 и $K/ДК$ 0.8 не выявлено ($p > 0.05$) (табл. 1).

Влияние дальнего красного света на продуктивность тритикале

При структурном анализе растений тритикале, культивированных под светом со спектральным составом, различающимся соотношением красного к дальнему красному, не наблюдали изменений в вегетативной массе и высоте соломины ($p > 0.05$). Доля дальнего красного света значительно повлияла на продуктивность колоса (табл. 2). При выращивании тритикале под $K/ДК$ 0.3 на обоих вариантах субстрата растения формировали более короткий колос с меньшим числом колосков, что приводило к снижению вегетативной массы колоса, а также количества зерна с колоса ($p < 0.05$). При увеличенной доле дальнего красного света у растений формировалось

Таблица 1. Средние значения ± 95 % доверительный интервал показателей сроков колошения и цветения у сорта Дублет, выращенного под светом с разным спектральным составом

Субстрат	Спектр света (К/ДК)	Время от посева до колошения, сутки	Время от посева до цветения, сутки
Минеральная вата	3.75	33.5 ± 1.0a ¹	37.3 ± 1.1a
	0.8	34.0 ± 1.6a	37.3 ± 1.9a
	0.3	31.1 ± 0.8b	34.7 ± 0.9b
Почвенная смесь	3.75	34.1 ± 0.9a	38.0 ± 1.0a
	0.8	33.7 ± 1.1a	36.9 ± 1.2a
	0.3	30.5 ± 1.2b	33.9 ± 1.2b

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3: ¹Значения, за которыми следует одна и та же буква, существенно не различаются ($p > 0.05$) согласно критерию Тьюки. Полушрифтным начертанием отмечены значения, существенно отличающиеся от других вариантов ($p < 0.05$).

Таблица 2. Средние значения ± 95 % доверительный интервал показателей структурного анализа элементов продуктивности сорта Дублет, выращенного под светом с разным спектральным составом

Показатель	Спектр света (К/ДК)		
	3.75	0.8	0.3
Минеральная вата			
Высота растений, см	57.9 ± 1.8a ¹	60.5 ± 2.2a	59.1 ± 1.6a
Вегетативная масса соломины, г	0.34 ± 0.08a	0.37 ± 0.04a	0.36 ± 0.02a
Длина колоса, см	5.5 ± 0.3ab	5.7 ± 0.4b	5.2 ± 0.1a
Вегетативная масса колоса, г	1.24 ± 0.15ab	1.40 ± 0.18b	1.15 ± 0.13a
Масса 1000 зерен, г	32.6 ± 2.0a	36.3 ± 4.9a	41.9 ± 2.0b
Число зерен/колос, шт.	30.1 ± 4.1ab	32.1 ± 4.3b	24.7 ± 2.3a
Число колосков/колос, шт.	14.2 ± 1.2a	13.7 ± 0.7a	12.2 ± 0.3b
Число зерен/колосок, шт.	2.1 ± 0.2a	2.3 ± 0.2a	2.0 ± 0.2a
Почвенная смесь			
Высота растений, см	60.8 ± 3.0a	60.5 ± 1.6a	58.4 ± 2.2a
Вегетативная масса соломины, г	0.41 ± 0.03a	0.46 ± 0.03a	0.44 ± 0.03a
Длина колоса, см	6.1 ± 0.3a	6.1 ± 0.3a	5.6 ± 0.2b
Вегетативная масса колоса, г	1.44 ± 0.11ab	1.52 ± 0.08b	1.34 ± 0.08a
Масса 1000 зерен, г	35.7 ± 2.9a	40.4 ± 1.7b	41.4 ± 2.3b
Число зерен/колос, шт.	33.1 ± 2.6a	30.6 ± 2.1a	26.1 ± 2.6b
Число колосков/колос, шт.	15.8 ± 1.1a	14.8 ± 0.7ab	13.9 ± 0.5b
Число зерен/колосок, шт.	2.1 ± 0.1a	2.1 ± 0.1a	1.9 ± 0.1b

меньше зерен в колоске, но только при выращивании растений на почвенной смеси. Несмотря на это, отмечено статистически значимое ($p < 0.05$) увеличение массы 1000 зерен у растений, культивированных при К/ДК 0.3 на обоих вариантах субстрата. В большинстве случаев не обнаружено статистически значимой разницы между вариантами К/ДК 3.75 и К/ДК 0.8 по показателям продуктивности.

Влияние дальнего красного света на жизнеспособность и прорастание семян

Отмечено статистически значимое уменьшение энергии прорастания и всхожести семян, сформировавшихся при увеличенной доли дальнего красного света ($p < 0.05$). У *in vitro* изолированных зародышей, полученных от рас-

тений, вегетирующих под тремя вариантами спектрального состава света, отсутствовали статистически значимые различия по регенерационной способности ($p > 0.05$) (табл. 3). Уже на третьи сутки с начала культивирования, вне зависимости от условий освещенности донорных растений у зародышей появлялись coleoptиль и корни, а через десять суток с начала культивирования зародыши имели один полноценный лист и хорошо развитую корневую систему.

Выращивание контрольных растений

Растения во всех контрольных условиях отличались продолжительным периодом «всходы–цветение». Массовое цветение тритикале сорта Дублет, по многолетним данным выращивания в условиях Краснодарского края, на-

Таблица 3. Энергия прорастания, всхожесть семян и частота регенерации изолированных зародышей, полученных от растений, культивированных под светом с разным спектральным составом

Субстрат	Спектр света (К/ДК)	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Регенерация изолированных зародышей, %
Минеральная вата	3.75	97.1 ± 4.0a ¹	96.5 ± 4.0a	97.5 ± 3.7a
	0.8	85.5 ± 8.5a	96.8 ± 2.5a	100 ± 0a
	0.3	44.1 ± 21.9b	77.7 ± 12.7b	100 ± 0a
Почвенная смесь	3.75	93.3 ± 4.5a	98.9 ± 1.6a	100 ± 0a
	0.8	51.3 ± 15.8b	81.4 ± 11.5b	100 ± 0a
	0.3	68.5 ± 17.3b	89.0 ± 10.8ab	100 ± 0a

ступало на 60–64-е сутки при посеве в начале марта и на 50–52-е сутки при посеве в начале апреля. В условиях климатической камеры с фотопериодом 18 ч день/6 ч ночь тритикале достигала фазы цветения на 62.5 ± 2.0 и 59.2 ± 2.6 сутки после посева на минеральной вате и почвенной смеси соответственно.

Обсуждение

В настоящее время спидбридинг активно применяют в различных направлениях генетики, селекции и биотехнологии (Ghosh et al., 2018). Проводятся модификация известных протоколов, упрощение их организации, перевод на высокопропускную способность, вовлечение методов молекулярной генетики и связывание с селекционным процессом (Kigoni et al., 2023; Marenkova et al., 2024). Протоколы спидбридинга успешно опробованы на злаках (Watson et al., 2018; Cha et al., 2021). Однако, несмотря на большую работу в этом направлении, в большинстве опубликованных работ по спидбридингу злаков не уделено должного внимания одному из сильнейших индукторов сокращения периода от посева до цветения – дальнему красному свету, хотя в условиях спидбридинга показана эффективность его применения для таких культур, как рапс (Song et al., 2022), амарант (Jähne et al., 2020) и перец (Choi et al., 2023).

Сокращение периода вегетации – одно из основных проявлений синдрома избегания тени, инициируемое дальним красным светом в фотопериодической регуляции цветения. Свет с повышенной долей дальнего красного света улавливается листьями и активирует фоторецепторы фитохромы, главным образом *PhyA* и *PhyB*. Фитохромы запускают экспрессию гена центрального регулятора цветения *CONSTANT (CO)*, который, в свою очередь, индуцирует *FLOWERING LOCUS T (FT)* – флориген в сосудистых пучках листьев. Белок FT перемещается от листьев к побеговой апикальной меристеме и вместе с белком *FD* (продуктом гена *FLOWERING LOCUS D (FD)*) запускает работу генов, в частности *SUPPRESSOR OF OVEREXPRESSION OF CO1 (SOC1)* и *APETALA1 (API)*, определяющих развитие флоральных меристем (Demotes-Mainard et al., 2016; Sheerin, Hiltbrunner, 2017; Лебедева и др., 2020).

Для оценки влияния эффекта дальнего красного света в условиях спидбридинга нами проведен эксперимент по выращиванию яровой тритикале на двух видах субстрата

и при трех вариантах освещения, различающихся между собой соотношением красного с дальним красным светом.

Проведенный нами эксперимент продемонстрировал значительное влияние увеличенной доли дальнего красного света ($K < ДК$, $K/ДК$ 0.3) на наступление фазы цветения у тритикале. Растения, находящиеся под светом со спектральным составом, в котором $K/ДК$ 0.3, зацветали на 33.9 ± 1.2 и 34.7 ± 0.9 сутки с момента посева при использовании почвенной смеси и кубиков минеральной ваты, что соответственно на 4.1 и 2.6 суток быстрее, чем при использовании спектра света, где $K/ДК$ 3.75. Статистически значимого различия по продолжительности вегетации тритикале под светом со спектрами $K > ДК$ и $K = ДК$ не обнаружено. Полученные результаты говорят о том, что для сокращения периода от посева до цветения тритикале важно не только наличие дальнего красного света, но и его соотношение с красным, а именно использование состава, близкого к соотношению $K/ДК$ 0.3 (рис. 2). Наши результаты согласуются с выводами, описанными в других исследованиях, демонстрирующих схожий эффект на злаках (Deitzer et al., 1979; Davis, Simmons, 1994; Toyota et al., 2014).

Несмотря на разницу сроков начала цветения, составляющую 2.6 и 4.1 суток, дальний красный можно считать хорошим дополнением к созданию условий, направленных на сокращение вегетации растений: так как если в одном поколении возможно сократить период «посев–цветение» на 3–4 суток, то суммарный эффект при выращивании последовательно шести поколений (среднее количество, способствующее получению чистой линии) может достигать 20 суток.

В настоящее время спидбридингу яровой и озимой тритикале посвящены единичные работы, демонстрирующие высокую отзывчивость этой культуры к факторам, влияющим на сокращение вегетационного периода (Cha et al., 2021; Zheng et al., 2023). Показано, что для яровой тритикале время от посева до колошения составляет в среднем 33–42 дня в зависимости от генотипа (Cha et al., 2021), в то время как яровая мягкая пшеница в условиях спидбридинга зацветает в зависимости от генотипа на 35.7–75 сутки с момента посева (Ghosh et al., 2018; Watson et al., 2018; Cha et al., 2020). Наша работа подтверждает значительное влияние метода спидбридинга на сокращение вегетационного периода у тритикале: модифицированный по спектральному составу протокол позволил

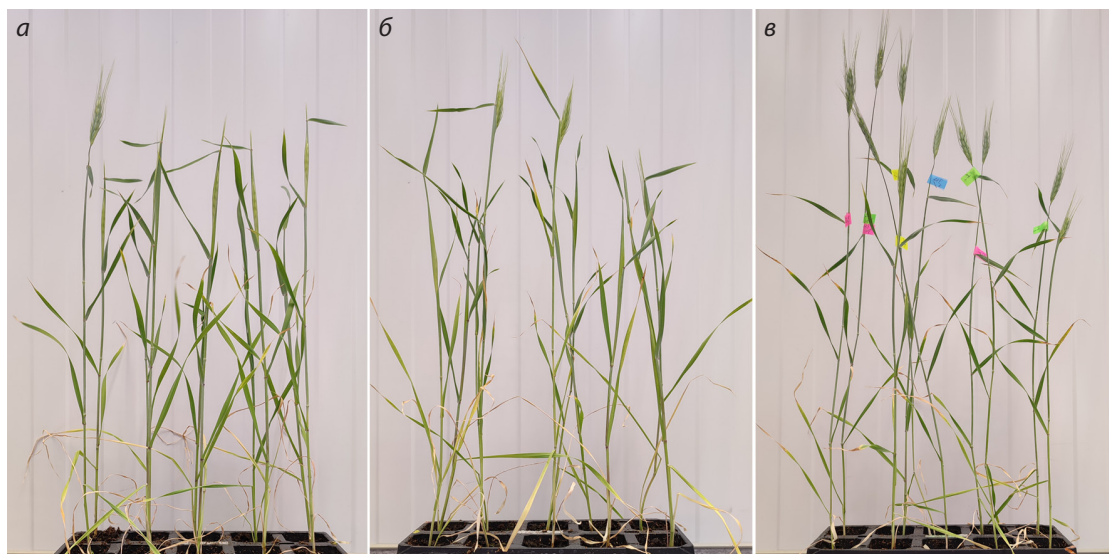


Рис. 2. Растения на 30-е сутки с момента посева (все растения посеяны в один день), культивируемые под тремя вариантами освещения с разным спектральным составом света и находящиеся в фазе: а, б – начала колошения, К/ДК 3.75 (а), К/ДК 0.8 (б); в – полного колошения, К/ДК 0.3.

инициировать цветение уже на 33.9 ± 1.2 сутки с момента посева. Аналогичный сорт тритикале в полевых условиях Краснодарского края и классических лабораторных условиях выращивания зацвёл на 25–29 суток позже, чем в условиях спидбридинга.

Результаты оценки структуры урожая тритикале не показали значительных изменений в высоте изучаемых растений при выращивании под светом со спектральным составом с увеличенной долей дальнего красного света, хотя в многочисленных работах сообщается об удлинении стебля злаков при использовании дальнего красного света (Kegge et al., 2015; Lei et al., 2022). Синдром избегания затенения, вызывающий элонгацию побегов, отсутствует и в других работах, где дальний красный свет был дополнением к более коротким длинам волн (400–680 нм) (Huber et al., 2024). Это свидетельствует о том, что использование увеличенной доли дальнего красного света в условиях спидбридинга тритикале не приводит к такому вызывающему неудобство в работе фактору, как формирование высоких растений и их полегание.

Полученные нами данные продемонстрировали весо-мое влияние дальнего красного света на продуктивность колоса тритикале. У растений сорта Дублет при освещении со спектральным составом, где К/ДК 0.3, формировался более короткий колос, с меньшим числом колосков, что приводило к значительному уменьшению вегетативной массы колоса, а также количеству зерна в колосе. Схожие результаты были описаны и у мягкой пшеницы, у которой при увеличенной доле дальнего красного света уменьшается количество фертильных цветков, а также озерненность колоса (Ugarte et al., 2010; Drecser et al., 2022), что, вероятно, связано с ингибирующим воздействием дальнего красного света на усвоение растением азота (Lei et al., 2024).

Вопреки негативному влиянию дальнего красного света на элементы продуктивности колоса, масса 1000 зерен у тритикале, выросшей при увеличенной доле дальнего

красного света, оказалась намного выше. Это может быть связано с эффектом Эмерсона, заключающимся в увеличении эффективности фотосинтеза при использовании дальнего красного света совместно с более короткими длинами волн (400–680 нм) (Huber et al., 2024).

В ходе нашей работы также обнаружено статистически значимое негативное влияние дальнего красного света на энергию прорастания и всхожесть семян. Всхожесть семян, полученных от тритикале, выросшей под светом со спектром, где К/ДК 0.3, варьировала от 77.7 ± 12.7 до 89.0 ± 10.8 % в зависимости от субстрата для выращивания. При этом регенерационные свойства изолированных *in vitro* зародышей были одинаково хороши у всех семян вне зависимости от освещения, при котором росли донорные растения. Так как у злаков спидбридинг совместим с односемянным методом отбора (Alahmad et al., 2018; Watson et al., 2018), при котором для каждого следующего поколения отбирают по одному семени с колоса для сохранения генетического разнообразия и предотвращения расширения площадей, использование большого количества дальнего красного света не станет ограничивающим фактором при выращивании растений таким методом. Однако следует отметить, что, если главной целью выращивания растений являются размножение и получение семян с хорошей всхожестью, необходимо уменьшить долю дальнего красного света до уровня, при котором К/ДК > 1.

Заключение

Нами показано, что использование увеличенной доли дальнего красного света (К/ДК 0.3) по сравнению с вариантом освещения К/ДК 3.75 в условиях спидбридинга приводит к статистически значимому сокращению времени от посева до цветения на 2.6 и 4.1 суток у растений, культивируемых на минеральной вате и почвенной смеси, соответственно. Статистически значимого различия по продолжительности периода от посева до цветения

между вариантами К/ДК 3.75 и К/ДК 0.8 не выявлено. Модифицированный по спектральному составу света протокол спидбридинга позволил инициировать цветение уже на 33.9 ± 1.2 сутки с момента посева. Аналогичный сорт тритикале в полевых условиях Краснодарского края и классических лабораторных условиях выращивания с фотопериодом 18/6 ч день/ночь зацветал на 25–29 суток позже, чем в условиях модифицированного спидбридинга. При использовании увеличенной доли дальнего красного света не обнаружено статистически значимого увеличения высоты растений, однако обнаружено негативное влияние дальнего красного света на параметры колоса – длину и вегетативную массу колоса, число колосков и зерен на колос, а также энергию прорастания и всхожесть семян. С высокой долей уверенности предполагаем, что увеличение доли дальнего красного света (К/ДК 0.3) может быть полезным дополнением при выращивании в условиях спидбридинга не только тритикале, но и других злаков.

Список литературы / References

- Лебедева М.А., Додуева И.Е., Ганчева М.С., Творогова В.Е., Кузнецова К.А., Лутова Л.А. Эволюционные аспекты регуляции цветения: «флоригены» и «антифлоригены». *Генетика*. 2020; 56(11):1279–1303. doi 10.31857/S0016675820110065
- [Lebedeva M.A., Dodueva I.E., Gancheva M.S., Tvorogova V.E., Kuznetsova K.A., Lutova L.A. The evolutionary aspects of flowering control: Florigens and Anti-florigens. *Russ J Genet*. 2020; 56(11):1323–1344. doi 10.1134/S102279542011006X]
- Леконцева Т.А., Юферева Н.И., Стаценко Е.С. Оценка исходного материала для создания сортов яровой тритикале в условиях Волго-Вятского региона. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2019;2(50):45–52. doi 10.22450/1999-6837-2019-2-45-52
- [Lekontzeva T.A., Yufereva N. I., Statzenko E.S. Assessment of initial material (base line) for creation of spring triticale varieties in the climate of Volgo-Vyatka region. *Dal'nevostochnyy Agrarnyy Vestnik = The Far East Agrarian Herald*. 2019;2(50):45–52. doi 10.24411/1999-6837-2019-2-45-52 (in Russian)]
- Радивон В.А., Жуковский А.Г. Анализ поражаемости сортов яровой тритикале болезнями за 2012–2022 гг. *Защита растений*. 2023;1(47):128–135
- [Radivon V.A., Zhukovsky A.G. Analysis of the susceptibility of spring triticale varieties to diseases for 2012–2022. *Zashchita Rasteniy = Plant Protection*. 2023;1(47):128–135 (in Russian)]
- Тимонова Е.М., Адонина И.Г., Салина Е.А. Изучение влияния чужеродных транслокаций на показатели андрогенеза *in vitro* у линий мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(1):127–134. doi 10.30901/2227-8834-2022-1-127-134
- [Timonova E.M., Adonina I.G., Salina E.A. The influence of combinations of alien translocations on *in vitro* androgenesis in spring common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Trudy po Prikladnoy Botanike, Genetike i Selektzii = Proceedings on Applied Botany, Genetics, and Breeding*. 2022;183(1):127–134. doi 10.30901/2227-8834-2022-1-127-134 (in Russian)]
- Alahmad S., Dinglasan E., Leung K.M., Riaz A., Derbal N., Vossfels K.P., Able C.J., Bassi F.M., Christopher C.J., Hickey L.T. Speed breeding for multiple quantitative traits in durum wheat. *Plant Methods*. 2018;14:36. doi 10.1186/s13007-018-0302-y
- Arseniuk E. Recent developments in triticale breeding research and production – an Overview. *Ekin J Crop Breed Genet*. 2019;5(2): 68–73
- Cha J.K., Lee J.H., Lee S.M., Ko J.M., Shin D.J. Heading date and growth character of Korean wheat cultivars by controlling photoperiod for rapid generation advancement. *Korean J Breed Sci*. 2020; 52(1):20–24. doi 10.9787/KJBS.2020.52.1.20
- Cha J.K., Park M.R., Shin D., Kwon Y., Lee S.M., Ko J.M., Kim K.M., Lee J.H. Growth characteristics of triticale under long-day photoperiod for rapid generation advancement. *Korean J Breed Sci*. 2021; 53(3):200–205. doi 10.9787/KJBS.2021.53.3.200
- Cha J.K., O'Connor K., Alahmad S., Lee J.H., Dinglasan E., Park H., Lee S.M., ... Kim K.M., Ko J.M., Hickey L.T., Shin D., Dixon L.E. Speed vernalization to accelerate generation advance in winter cereal crops. *Mol Plant*. 2022;15(8):1300–1309. doi 10.1016/j.molp.2022.06.012
- Choi H., Back S., Kim G.W., Lee K., Venkatesh J., Lee H.B., Kwon J.K., Kang B.C. Development of a speed breeding protocol with flowering gene investigation in pepper (*Capsicum annuum*). *Front Plant Sci*. 2023;14:1151765. doi 10.3389/fpls.2023.1151765
- Davis M.H., Simmons S.R. Far-red light reflected from neighbouring vegetation promotes shoot elongation and accelerates flowering in spring barley plants. *Plant Cell Environ*. 1994;17(7):829–836. doi 10.1111/j.1365-3040.1994.tb00177.x
- Deitzer G.F., Hayes R., Jabben M. Kinetics and time dependence of the effect of far-red light on the photoperiodic induction of flowering in Wintex barley. *Plant Physiol*. 1979;64(6):1015–1021. doi 10.1104/pp.64.6.1015
- Demotes-Mainard S., Peron T., Corot A., Bertheloot J., Gourrierc J.L., Pelleschi-Travier S., Crespel L., Morel P., Huche-Thelier L., Boumaza R., Vian A., Guerin V., Leduc N., Sakr S. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Envir Exp Bot*. 2016; 121:4–21. doi 10.1016/j.envexpbot.2015.05.010
- Dreecer M.F., Zwart A.B., Schmidt R.C., Condon A.G., Awasi M.A., Grant T.J., Galle A., Bourrot S., Froberg C. Wheat yield potential can be maximized by increasing red to far-red light conditions at critical developmental stages. *Plant Cell Environ*. 2022;45(9):2652–2670. doi 10.1111/pce.14390
- Faccini N., Morcia C., Terzi V., Rizza F., Badeck F.W. Triticale in Italy. *Biology*. 2023;2(10):1308. doi 10.3390/biology12101308
- Fedyaeva A.V., Salina E.A., Shumny V.K. Pre-harvest sprouting in soft winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and evaluation methods. *Russ J Genet*. 2023;59(1):1–11. doi 10.1134/S1022795423010052
- Ficht A., Bruch A., Rajcan I., Pozniak C., Lyons E.M. Evaluation of the impact of photoperiod and light intensity on decreasing days to maturity in winter wheat. *Crop Sci*. 2023;63(2):812–821. doi 10.1002/csc2.20886
- Ghosh S., Watson A., Gonzalez-Navarro O.E., Ramirez-Gonzalez R.H., Yanes L., Mendoza-Suarez M., Simmonds J., ... Domoney C., Uauy C., Hazard B., Wulff B.B.H., Hickey L.T. Speed breeding in growth chambers and glasshouses for crop breeding and model plant research. *Nat Protoc*. 2018;13(12):2944–2963. doi 10.1038/s41596-018-0072-z
- Hickey L.T., German S.E., Pereyra S.A., Diaz J.E., Ziemls L.A., Fowler R.A., Platz G.J., Francowiak J.D., Dieters M.J. Speed breeding for multiple disease resistance in barley. *Euphytica*. 2017;213:64. doi 10.1007/s10681-016-1803-2
- Huber M., de Boer H.J., Romanowski A., van Veen H., Buti S., Kahlon P.S., van der Meijden J., Koch J., Pierik R. Far-red light enrichment affects gene expression and architecture as well as growth and photosynthesis in rice. *Plant Cell Environ*. 2024;47(8):2936–2953. doi 10.1111/pce.14909
- Jähne F., Hahn V., Würschum T., Leiser W.L. Speed breeding short-day crops by LED-controlled light schemes. *Theor Appl Genet*. 2020; 133(8):2335–2342. doi 10.1007/s00122-020-03601-4
- Kalituho L.N., Chaika M.T., Kabashnikova L.F., Makarov V.N., Khirpach V.A. On the phytochrome mediated action of brassinosteroids. *Proc Plant Growth Regul Soc Am*. 1997;24:140–145
- Kegge W., Ninkovic V., Glinwood R., Welschen R.A.M., Voese-nek L.A.C.J., Pierik R. Red: far-red light conditions affect the emission of volatile organic compounds from barley (*Hordeum vulgare*), leading to altered biomass allocation in neighbouring plants. *Ann Bot*. 2015;115(6):961–970. doi 10.1093/aob/mcv036
- Kigoni M., Choi M., Arbelaez J.D. 'Single-Seed-SpeedBulks': a protocol that combines 'speed breeding' with a cost-efficient modified

- single-seed descent method for rapid-generation-advancement in oat (*Avena sativa* L.). *Plant Methods*. 2023;19(1):92. doi 10.1186/s13007-023-01067-1
- Kippes N., VanGessel C., Hamilton J., Akpinar A., Budak H., Dubcovsky J., Pearce S. Effect of *phyB* and *phyC* loss-of-function mutations on the wheat transcriptome under short and long day photoperiods. *BMC Plant Biol*. 2020;20:297. doi 10.1186/s12870-020-02506-0
- Lei K., Tan Q., Zhu L., Xu L., Yang S., Hu J., Gao L., Hou P., Shao Yu., Jiang D., Cao W., Dai T., Tian Z. Low red/far-red ratio can induce cytokinin degradation resulting in the inhibition of tillering in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Front Plant Sci*. 2022;13:971003. doi 10.3389/fpls.2022.971003
- Lei K., Hu H., Chang M., Sun C., Ullah A., Yu J., Dong C., Gao Q., Jiang D., Cao W., Tian Z., Dai T. A low red/far-red ratio restricts nitrogen assimilation by inhibiting nitrate reductase associated with downregulated *TaNR1.2* and upregulated *TaPIL5* in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiol Biochem*. 2024;206:107850. doi 10.1016/j.plaphy.2023.107850
- Li H., Zhou Y., Xin W., Wei Y., Zhang J., Guo L. Wheat breeding in northern China: achievements and technical advances. *Crop J*. 2019; 7(6):718-729. doi 10.1016/j.cj.2019.09.003
- Liu H., Zwer P., Wang H., Liu C., Lu Z., Wang Y., Yan G. A fast generation cycling system for oat and triticale breeding. *Plant Breed*. 2016;135(5):574-579. doi 10.1111/pbr.12408
- Losert D., Maurer H.P., Marulanda J.J., Würschum T. Phenotypic and genotypic analyses of diversity and breeding progress in European triticale ($\times$ *Triticosecale* Wittmack). *Plant Breed*. 2017;136(1): 18-27. doi 10.1111/pbr.12433
- Marenkova A.G., Blinkov A.O., Radzeniece S., Kocheshkova A.A., Karlov G.I., Divashuk M.G. Testing and modification of the protocol for accelerated growth of malting barley under speed breeding conditions. *Nanobiotechnol Rep*. 2024;19(5):808-814. doi 10.1134/S2635167624601955
- Markham M.Y., Stoltenberg D.E. Corn morphology, mass, and grain yield as affected by early-season red: Far-red light environments. *Crop Sci*. 2010;50(1):273-280. doi 10.2135/cropsci2008.10.0614
- Mergoum M., Singh P.K., Pena R.J., Lozano-del Río A.J., Cooper K.V., Salmon D.F., Gómez Macpherson H. Triticale: A "New" Crop with Old Challenges. In: Carena M. (Eds). *Cereals. Handbook of Plant Breeding*. Vol. 3. Springer, 2009;267-287. doi 10.1007/978-0-387-72297-9
- Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiol Plant*. 1962;15(3):473-497. doi 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- Rajcan I., Chandler K.J., Swanton C.J. Red-far-red ratio of reflected light: a hypothesis of why early-season weed control is important in corn. *Weed Sci*. 2004;52(5):774-778. doi 10.1614/WS-03-158R
- Sheerin D.J., Hiltbrunner A. Molecular mechanisms and ecological function of far-red light signalling. *Plant Cell Environ*. 2017;40(11): 2509-2529. doi 10.1111/pce.12915
- Smith H. Phytochromes and light signal perception by plants – an emerging synthesis. *Nature*. 2000;407(6804):585-591. doi 10.1038/35036500
- Song Y., Duan X., Wang P., Li X., Yuan X., Wang Z., Li X., Yuan X., Wang Z., Wan L., Yang G., Hong D. Comprehensive speed breeding: a high-throughput and rapid generation system for long-day crops. *Plant Biotechnol J*. 2022;20(1):13-15. doi 10.1111/pbi.13726
- Tanaka J., Hayashi T., Iwata H. A practical, rapid generation-advancement system for rice breeding using simplified biotron breeding system. *Breed Sci*. 2016;66(4):542-551. doi 10.1270/jsbbs.15038
- Toyota M., Tatewaki N., Morokuma M., Kusutani A. Tillering responses to high red/far-red ratio of four Japanese wheat cultivars. *Plant Prod Sci*. 2014;17(2):124-130. doi 10.1626/pp.17.124
- Ugarte C.C., Trupkin S.A., Ghiglione H., Slafer G., Casal J.J. Low red/far-red ratios delay spike and stem growth in wheat. *J Exp Bot*. 2010;61(11):3151-3162. doi 10.1093/jxb/erq140
- Vikas V.K., Sivasamy M., Jayaprakash P., Vinod K.K., Geetha M., Nisha R., Peter J. Customized speed breeding as a potential tool to advance generation in wheat. *Indian J Genet Plant Breed*. 2021; 81(2):199-207. doi 10.31742/IJGPB.81.2.3
- Watson A., Ghosh S., Williams M.J., Cuddy W.S., Simmonds J., Rey M.D., Hatta M.A.M., ... Uauy C., Boden S.A., Park R.F., Wulff B.B.H., Hickey L.T. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nat Plants*. 2018;4(1):23-29. doi 10.1038/s41477-017-0083-8
- Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res*. 1974;14(6):415-421. doi 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x
- Zakieh M., Gaikpa D.S., Leiva Sandoval F., Alamrani M., Henriksen T., Odilbekov F., Chawade A. Characterizing winter wheat germplasm for fusarium head blight resistance under accelerated growth conditions. *Front Plant Sci*. 2021;12:705006. doi 10.3389/fpls.2021.705006
- Zheng Z., Gao S., Wang H., Liu C. Shortening generation times for winter cereals by vernalizing seedlings from young embryos at 10 degree Celsius. *Plant Breed*. 2023;142(2):202-210. doi 10.1111/pbr.13074

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 05.11.2024. После доработки 13.05.2025. Принята к публикации 14.05.2025.