

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ ТРИТИКАЛЕ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ СЕМЯН РЕГУЛЯТОРАМИ РОСТА

© 2015 г. О.А. Калмацкая, В.А. Караваяев, Л.Э. Гунар*, А.Г. Мякинков*

Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, корп. 2;

E-mail: karavaev@phys.msu.ru

**Технологический факультет Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49*

Поступила в редакцию

Показано, что предпосевная обработка семян тритикале регуляторами роста эпином и цирконом приводит к увеличению отношения F_{742}/F_{686} стационарных значений интенсивности флуоресценции листьев растений на длинах волн 742 и 686 нм, соответствующих максимумам в спектре флуоресценции листа. У тритикале, выращенных из семян, которые были обработаны регуляторами роста, наблюдалось увеличение содержания хлорофилла, урожайности и основных показателей структуры урожая.

Ключевые слова: тритикале, регуляторы роста, хлорофилл, спектры флуоресценции.

Люминесцентные показатели фотосинтезирующих объектов зависят от широкого круга биотических и абиотических факторов и являются весьма привлекательными для использования в целях мониторинга состояния фотосинтетического аппарата и оценки его функциональной активности [1–3]. Существенным достоинством люминесцентных методов исследования является то, что они, как правило, позволяют выявить изменения в фотосинтетическом аппарате на ранних стадиях воздействия того или иного фактора, еще до появления характерных морфологических изменений [1,4–6]. Установление взаимосвязи между люминесцентными и физиологическими характеристиками растений представляет собой важную и актуальную задачу.

В предыдущих работах [6,7] было зарегистрировано увеличение показателя $(F_M - F_T)/F_T$ медленной индукции флуоресценции листьев ячменя, обработанного физиологически активными веществами (F_M – максимальное, F_T – стационарное значение интенсивности флуоресценции на длине волны 686 нм), и в конечном итоге – повышение урожайности и основных показателей структуры урожая опытных растений. Наряду с индукционными изменениями флуоресценции на фиксированной длине волны, большой интерес исследователей вызывает изучение спектров флуоресценции зеленого листа [8,9]. Известно [8,9], что спектры флуоресценции

хлорофилла в листьях растений, как правило, имеют два широких максимума в красной области спектра: один на длине волны 680–690 нм (F_1), другой – на длине волны 730–740 нм (F_2). Показано [8], что отношение $\omega = F_2/F_1$ стационарных значений F_2 и F_1 , регистрируемых по завершении индукционного процесса, зависит от целого ряда факторов: характера минерального питания, концентрации CO_2 , освещенности и длительности светового дня, влажности почвы и воздуха и других, причем оптимальным условиям развития растений, как правило, соответствуют максимальные значения ω . Во всех случаях, исследованных в [8], величина ω и относительная скорость прироста биомассы зависели от одних и тех же факторов и их изменения всегда были однонаправлены.

В данной работе исследовали люминесцентные и физиологические показатели растений тритикале – гибрида пшеницы и ржи. Тритикале обладает высокой питательной ценностью и все шире используется как продовольственная и кормовая культура. Для стимуляции ростовых процессов тритикале использовали регуляторы роста эпин (действующее вещество эпибрассинолид) и циркон (смесь оксикоричных кислот). Ранее было показано рострегулирующее действие этих препаратов при опрыскивании посевов ячменя, зависевшее, однако, от погодных условий данного года [10]. Цель данной работы:

Люминесцентные (F_{742}/F_{686}) и физиологические показатели тритикале при обработке семян эпином и цирконом

Показатель	Контроль	Эпин	Циркон
F_{742}/F_{686}	$1,38 \pm 0,09$	$1,75 \pm 0,10$	$1,69 \pm 0,10$
Высота растений, см	$41,0 \pm 3,0$	$61,0 \pm 6,0$	$60,0 \pm 5,0$
Хл a + Хл b , мг на 1 г сырой массы листа	$1,97 \pm 0,09$	$2,30 \pm 0,12$	$2,30 \pm 0,12$
Хл a / Хл b	$2,34 \pm 0,06$	$2,49 \pm 0,07$	$2,49 \pm 0,07$
Урожайность, т/га	$4,52 \pm 0,25$	$5,22 \pm 0,25$	$5,12 \pm 0,15$

(1) изучить влияние эпина и циркона на рост и развитие растений тритикале при предпосевной обработке семян, а также (2) установить взаимосвязь между значениями люминесцентного показателя $\omega = F_2/F_1$ листьев тритикале, с одной стороны, и физиологическими показателями (содержание хлорофилла, биометрические показатели, продуктивность растений) с другой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опыт проводили на полевой опытной станции РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева в 2012–2013 гг. В работе использовали тритикале сорта «Валентин». Непосредственно перед посевом (август 2012 г.) семена обрабатывали препаратами «Эпин-Экстра» и «Циркон» (фирма Нэст-М) согласно рекомендациям производителя. Нормы расхода препаратов в расчете на 1 т семян составляли: для эпина-экстра – 200 мл, для циркона – 2 мл. Для получения рабочего состава указанные количества препаратов разводили в 10 л воды.

Измерения высоты растений, содержания хлорофилла и параметров флуоресценции проводили в начале июня 2013 г. Флуоресценцию листьев тритикале измеряли на спектрофлуориметре Solar CM2203. Высечку из листа среднего яруса помещали в держатель, выдерживали в темноте в течение 5 мин, а затем освещали светом с длиной волны 450 нм интенсивностью около 150 Вт/м². Флуоресценцию регистрировали одновременно на двух длинах волн: 686 и 742 нм, соответствующих максимумам в спектре флуоресценции листа. Стационарные значения интенсивностей флуоресценции F_{686} и F_{742} фиксировали через 20 мин освещения, в качестве флуоресцентного показателя использовали отношение $\omega = F_{742}/F_{686}$.

Содержание хлорофилла в листьях растений измеряли используя ацетоновые вытяжки по методике, описанной в [11]. Среднюю высоту надземной части тритикале оценивали по 10-ти растениям. Урожайность и основные показате-

ли структуры урожая определяли по методикам, описанным в работе [12]. Измерения флуоресцентных показателей проведены в трехкратной, а урожайности – в четырехкратной повторности. В таблице указаны стандартные отклонения от средних значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Растения тритикале, выращенные из семян, которые прошли предпосевную обработку эпином и цирконом, были существенно более развиты по сравнению с контрольными растениями, их высота на 45–50% превышала контрольные значения (таблица). Содержание хлорофиллов a и b в листьях опытных растений в расчете на сырую массу также было выше, при одновременном увеличении отношения Хл a /Хл b (таблица). Известно, что хлорофилл a входит в состав как коровых комплексов реакционных центров, так и периферических антенны фотосистем I и II (ФС I и ФС II), в то время как хлорофилл b преимущественно является компонентом подвижных светособирающих комплексов, обеспечивающих согласованную работу обеих фотосистем [13]. Таким образом, увеличение отношения Хл a /Хл b в листьях тритикале при обработке семян эпином и цирконом может указывать на изменение стехиометрического соотношения между комплексами фотосистем и светособирающими комплексами. Аналогичный эффект наблюдался ранее при опрыскивании ячменя эпином и цирконом [10].

Стационарные значения люминесцентного показателя $\omega = F_{742}/F_{686}$ у растений тритикале при обработке семян регуляторами роста были примерно на 25% выше, чем у контрольных растений (таблица). Ранее однонаправленные изменения этого показателя и содержания хлорофилла в листьях растений были установлены на листьях огурца разных ярусов [14], растениях, выращенных в условиях различного минерального питания [15] и пониженной освещенности [16], в ходе осенней деградации хлорофилла [17] и ряде других случаев. Предполагается, что

зависимость стационарного значения ω от содержания хлорофилла связана с эффектом перепоглощения флуоресценции хлорофилла внутри листа [9].

Анализ индукционных кривых флуоресценции показал, что в течение первой минуты освещения, до момента достижения второго максимума медленной индукции флуоресценции, значения F_{742} и F_{686} для всех исследованных вариантов были практически одинаковы. При последующем освещении наблюдалось тушение флуоресценции на обеих длинах волн, при этом отношение F_{742}/F_{686} постепенно увеличивалось от значений, близких к единице, до стационарных значений, приведенных в таблице. Увеличение отношения F_{742}/F_{686} в индукционном периоде, как предполагается, является показателем регуляторных процессов, затрагивающих фотосинтетический аппарат [9]. Один из таких процессов заключается в перераспределении энергии возбуждения между фотосистемами в пользу ФС I. Классический механизм этих изменений включает обратимое фосфорилирование специального светособирающего хлорофилл-белкового комплекса с помощью протеинкиназы, активность которой зависит от степени восстановленности пластохинонового пула переносчиков электронов между фотосистемами [18–20]. Учитывая изменения в пигментном комплексе растений, семена которых были обработаны эпином и цирконом, нельзя исключить, что увеличение стационарных значений $\omega = F_{742}/F_{686}$ у опытных растений по сравнению с контрольными связано с изменениями коэффициентов фото- и нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла, обусловленными, в свою очередь, повышением функциональной активности фотосинтетического аппарата [21]. Таким образом, увеличение показателя $\omega = F_{742}/F_{686}$ у тритикале при обработке семян регуляторами роста может свидетельствовать об увеличении фотосинтетической активности опытных растений. Этот вывод согласуется с результатами работ [22,23], в которых, с использованием метода медленной индукции флуоресценции, отмечено повышение фотосинтетической активности злаковых культур (рожь, ячмень) под действием эпина и циркона, как при предпосевной обработке семян, так и при опрыскивании растений в фазу их наиболее интенсивного роста и развития.

Усиление ростовых процессов у тритикале при обработке семян регуляторами роста привело к повышению урожайности (на 12–15% по сравнению с контролем, таблица) при одновременном увеличении ряда показателей структуры

урожая, в частности, общей и продуктивной кустистости и массы 1000 зерен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, увеличение физиологических показателей (содержание хлорофилла, высота растений) тритикале при обработке семян эпином и цирконом сопровождалось увеличением люминесцентного показателя F_{742}/F_{686} и в конечном итоге – повышением урожайности тритикале. Полученные результаты указывают на перспективность использования спектров флуоресценции зеленого листа для оценки эффективности различных ростстимулирующих препаратов, применяемых в сельскохозяйственной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*, ed. by G. C. Papageorgiou, Govindjee (Springer, Dordrecht, 2004).
2. Т. В. Нестеренко, А. А. Тихомиров и В. Н. Шихов, Журн. общей биологии **68**, 444 (2007).
3. N. R. Baker, Annu. Rev. Plant Biol. **59**, 89 (2008).
4. М. К. Solntsev, Н. Р. F. Ekobena, V. A. Karavaev, and T. P. Yurina, J. Luminescence **76–77**, 349 (1998).
5. С. А. Глазунова, В. В. Птушенко, Л. Э. Гунар и др. Биофизика **54**, 492 (2009).
6. В. А. Караваев, Л. Э. Гунар, А. Г. Мякинков и др., Биофизика **57**, 662 (2012).
7. Л. Э. Гунар, А. Г. Мякинков, С. А. Глазунова и В. А. Караваев, Изв. ТСХА **2**, 91 (2009).
8. К. Б. Асланиди, А. А. Шалапенко, В. Н. Карнаухов и др., *Метод определения функционального состояния растений по спектрам флуоресценции хлорофилла (техника биомониторинга)* (Изд-во НЦБИ АН СССР, Пушино, 1988).
9. С. Buschmann, Photosynth. Res. **92**, 261 (2007).
10. Л. Э. Гунар, А. Г. Мякинков, В. А. Караваев и др., Вестн. Московского государственного университета леса (Лесной вестник) **34**, 132 (2004).
11. М. В. Гусев, *Малый практикум по физиологии растений*, под ред. М.В. Гусева (Изд-во МГУ, М., 1982).
12. Б. А. Доспехов, *Методика полевого опыта* (Колос, М., 1985).
13. G. F. Peter and G. P. Thornber, J. Biol. Chem. **266**, 16745 (1991).
14. В. В. Заворуев, Е. Н. Заворуева и А. В. Шелегов, Биофизика **45**, 704 (2000).
15. С. М. Кочубей, Т. М. Шадчина и Н. С. Одиноккий, Физиол. и биохимия культ. растений **18**, 35 (1986).
16. О. А. Калмацкая, И. П. Левыкина, С. В. Пацаева и др., Вестн. МГУ Сер. физика, астрономия **6**, 31 (2013).
17. N. D'Ambrosio, K. Szabo, and H. K. Lichtenthaler, Radiat. and Environ. Biophys. **31**, 51 (1992).

18. J. F. Allen, *Biochim. Biophys. Acta* **1098**, 275 (1992).
 19. J. Minagava, *Biochim. Biophys. Acta* **1807**, 897 (2011).
 20. M. Tikkanen and E.-M. Aro, *Biochim. Biophys. Acta* **1817**, 232 (2012).
 21. U. Schreiber, U. Schliva, and W. Bilger, *Photosynth. Res.* **10**, 51 (1986).
 22. V. A. Karavaev, L. E. Gunar, A. G. Myakinkov, and M. K. Solntsev, *Collection of Scientific Papers, Faculty of Agriculture in Ceske Budejovice, Series for Crop Sciences* **21**, 195 (2004).
 23. Л. Э. Гунар, А. Г. Мякинков и В. А. Караваев, *Докл. ТСХА* **281**, 294 (2009).

Luminescent and Physiological Indices of Triticale Under the Treatment of Seeds with Growth Regulators

O.A. Kalmatskaya*, V.A. Karavaev*, L.E. Gunar, and A.G. Myakinkov****

**Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1/2, Moscow, 119991 Russia*

***Faculty of Technology, Timiriazev Russian State Agrarian University,
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow, 127550 Russia*

It is shown that the before-sowing treatment of triticale seeds with growth regulators epin and zircon resulted in the increase in the F_{742}/F_{686} ratio of the stationary fluorescence intensities of the plant leaves at the wavelength bands, 742 and 686 nm, corresponding to the maxima in the leaf fluorescence spectrum. Triticale under the treatment of seeds with growth regulators showed higher chlorophyll content, higher productivity and higher indices of the crop yield.

Key words: triticale, growth regulators, chlorophyll, fluorescence spectra