

4. Antioxidant effect of carotenoids *in vivo* and *in vitro*: an overview / P. Palozza, N.I. Krinsky // Methods in enzymology Carotenoids (Part A. Chemistry, separation, quantitation, and antioxidation) / ed. L. Packer. San Diego: Academic Press.- 1992.- Vol. 213.- P. 403–420.

5. Гомбоева, С.Б. Некоторые природные и синтетические антиоксиданты как стабилизаторы превращения β -каротина в витамин А/ С.Б. Гомбоева, Н.Н. Гесслер, К.Б. Шумаев, Т.И. Хомич, А.Г. Мойсеенок, В.Я. Быховский // Биохимия.- 1998.- Т. 63.- N 2.- С. 224–229.

Характеристика фотосинтетических реакций проростков *Hordeum vulgare* при совместном воздействии *Fusarium culmorum* и повышенной температуры

Вачинская А. В.^{А*}, Русакович А. А.^А, Пшибытко Н. Л.^А

^А Белорусский государственный университет, кафедра клеточной биологии и биоинженерии растений, Минск, Беларусь. *E-mail: alina6805830@gmail.com

Одним из наиболее распространённых абиотических стрессовых факторов, с которым сталкиваются растения, является повышенная температура. Особую актуальность эта проблема приобретает в связи с глобальным потеплением климата. На сегодняшний день более 40% территорий умеренной климатической зоны Земли испытывают периодические воздействия повышенных температур, вызывающих стресс у растений [1]. Более того, ухудшение экологической ситуации на планете приводит к возникновению все большего количества стрессовых воздействий и их комбинаций. Грибы рода *Fusarium* Link относятся по способу питания к факультативным паразитам, которые способны поражать растения, начиная с момента прорастания зерновок и до конца их вегетации, вызывая как корневые гнили, так и фузариоз колоса. Для нашей республика показана их высокая вредоносность в посевах зерновых культур: пшеницы, ячменя, ржи [2]. Степень поражения болезнями варьирует в зависимости от погодных условий. Поэтому исследование совместного действия стрессовых факторов биотической и абиотической природы имеет как фундаментальное, так и практическое значение.

В представленной работе исследовано влияние повышенной температуры (40°C в течение 3 ч ежедневно на протяжении четырех суток), заражения *Fusarium culmorum* и их совместного действия на параметры флуоресценции хлорофилла в проростках *Hordeum vulgare* L. сорта «Гонар». Растения выращивались в стандартизированных условиях при температуре 24°C, освещении 120-140 $\mu\text{моль квантов м}^{-2} \text{с}^{-1}$, фотопериоде день/ночь 16/8 ч, на обеднённой среде (водопроводная вода). На 7 день проростки инокулировались спорами гриба *Fusarium culmorum*. Раствор

для инокуляции содержал гомогенизированную среду, на которой выращивался гриб. Тепловая обработка проводилась в воздушном термостате при температуре 40°C и освещенности 120 $\mu\text{моль квантов м}^{-2} \text{с}^{-1}$ в течение 3 ч. Воздействие повторялось в полуденные часы на протяжении 4 суток. Оценка световых фотосинтетических реакций проводилась на РАМ-флуориметре «JUNIOR-PAM» (Walz, Германия), для визуализации флуоресценции использовался «3D IMAGING-PAM» (Walz, Германия).

Анализ роста и развития *Fusarium culmorum* выявил более интенсивное его развитие при периодическом воздействии повышенной температуры (40°C). Образцы, культивируемые в условиях теплового стресса, приобретали более интенсивную розовую окраску мицелия (рис. 1а). С обратной стороны данных чашек Петри наблюдалось выраженное окрашивание среды в розово-бордовый цвет уже к 7-10 дню вегетации (рис. 1б), в то время как в нормальных условиях культивирования изменение окраски мицелия наблюдалось только на 16-20 день культивирования. Приобретение розово-бордового окрашивания у *Fusarium culmorum* ассоциировано со спороношением [3].

Для оценки фотосинтетической активности проростков *Hordeum vulgare* L. использовался метод индукции флуоресценции хлорофилла. С использованием метода имиджа флуоресценции первого листа показано, что очаги трахеомикозного увядания, возникающие после заражения *Fusarium culmorum*, характеризуются повышением интенсивности флуоресценции хлорофилла F (рис. 2). Причем существенное повышение уровня F фиксировалось на стадии, когда некроз тканей еще не наблюдался. Комбинированное воздействие *Fusarium culmorum* и повышенной температуры приводило к увеличению числа таких очагов. В то же время параметры флуоресценции хлорофилла, регистрируемые на площади 1 см^2 в средней части первого листа, (фоновый F_0 и максимальный F_m уровень флуоресценции хлорофилла, потенциальный (F_v/F_m) и эффективный ($Y(II)$) квантовый выход фотохимических реакций ФС2) не претерпевали существенных изменений. Эффективный квантовый выход фотохимической реакции ФС2 снижался относительно контроля только на третий день при воздействии температуры совместно с заражением *Fusarium culmorum*. Максимальное падение данного показателя было зарегистрировано на 8 сутки (на $11.8 \pm 0,4$ % относительно контроля).

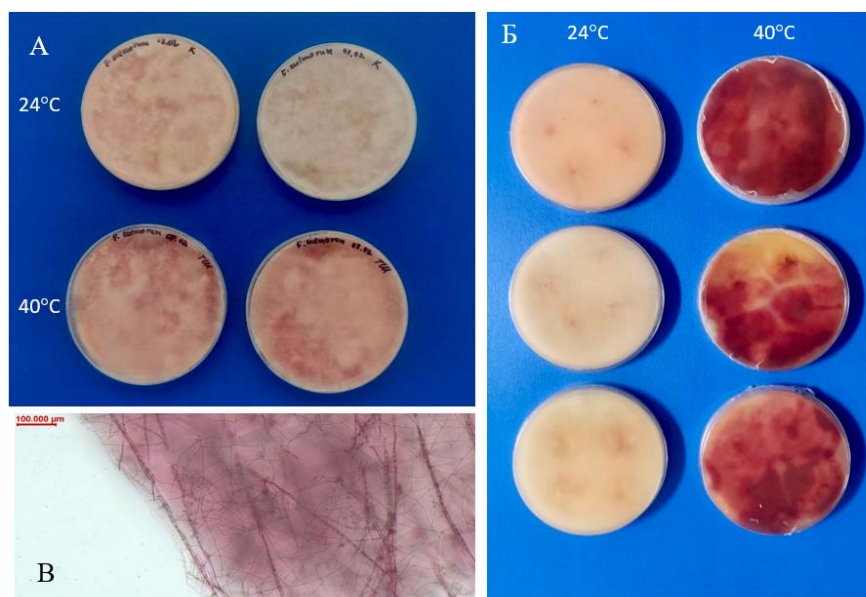


Рис 1. Внешний вид мицелия *Fusarium culmorum*, выращенного в течение 7 дней при температуре 24°C (контроль), и при периодической тепловой обработке (40°C, 3 ч, ежедневно):

а – вид сверху чашек Петри с мицелия *Fusarium culmorum*, *б* – вид снизу чашек Петри с мицелия *Fusarium culmorum*, *в* – мицелий *Fusarium culmorum*, полученный с помощью световой микроскопии

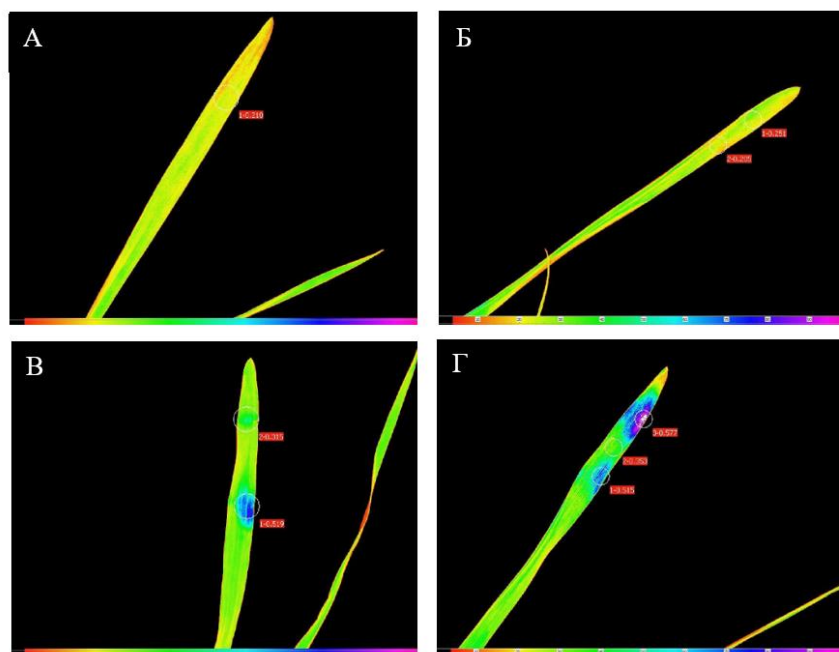


Рис. 2. Имидж флуоресценции хлорофилла листовой пластины 15-дневных проростков *Hordeum vulgare* L.:

а – без обработки; *б* – подвергшиеся периодической тепловой обработке (40°C, 120-140 $\mu\text{моль квантов м}^{-2} \text{с}^{-1}$, 3 ч в течение 4 дней) в 7-13-дневном возрасте; *в* – зараженные *Fusarium culmorum* в 7-дневном возрасте; *г* – подвергшиеся заражению *Fusarium culmorum* в 7-дневном возрасте и периодическому воздействию повышенной температуры (40°C, 120-140 $\mu\text{моль квантов м}^{-2} \text{с}^{-1}$, 3 ч) в течение 4 дней

Коэффициент фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла *a* (qP) снижался в ходе онтогенеза. Воздействие повышенной температуры ускоряло данный процесс, и снижение qP в подвергшихся периодическому воздействию теплового стресса составило $8,69 \pm 0,0818\%$ (относительно 7-дневного возраста). Заражение проростков ячменя *Fusarium culmorum* не приводило к значительному изменению показателя qP, в то время как совместное действие стрессоров снижало данный показатель на $17,1 \pm 2,8\%$ к 8 дню.

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла (NPQ) при воздействии повышенной температуры (40°C, 3 часа) статистически достоверно снижалось начиная с первого 3-часового воздействия (рис. 3). В то же время на третьи сутки было зарегистрировано статистически недостоверное повышение данного показателя. Заражение растений *Hordeum vulgare* L. *Fusarium culmorum* не влияло на коэффициент NPQ по крайней мере в течение 8 дней наблюдения после инокуляции патогена. Совместное воздействие температуры и инфицирования *Fusarium culmorum* приводило к значительному снижению NPQ спустя 3 часа. Максимальное падение NPQ (на $37,70 \pm 8,4 \%$) было зарегистрировано на третьи сутки.

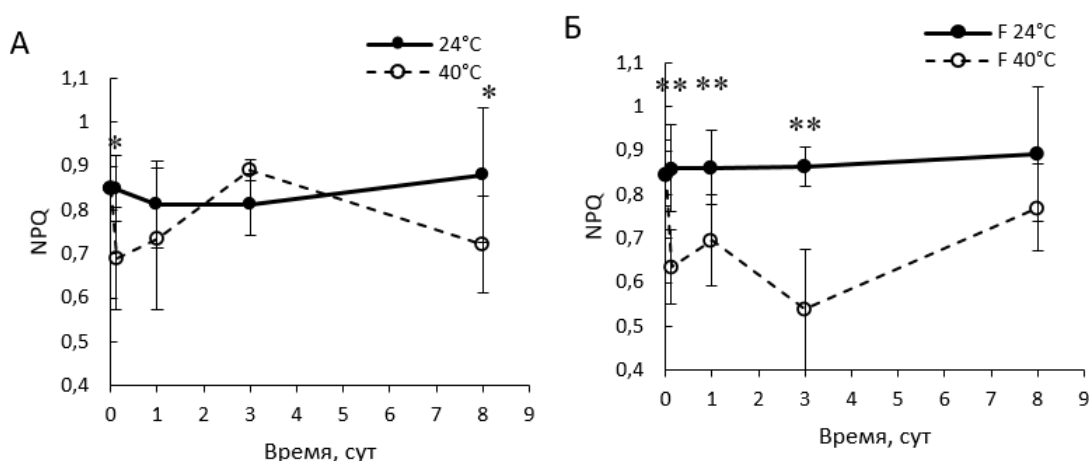


Рис. 3. Кинетика нефотохимического тушения флуоресценции Хл *a* при периодическом воздействии повышенной температуры (40°C, 3 ч) в необработанных (А) и зараженных *Fusarium culmorum* (Б);
* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$

Квантовый выход светоиндуцированного (регулируемого) нефотохимического тушения флуоресценции $Y(NPQ)$ при воздействии как повышенной температуры, так и совместном действии температуры и заражения *Fusarium culmorum* снижался в первые сутки, а затем возвращался к контрольному значению. Квантовый выход нерегулируемого тепловыделения и излучения флуоресценции хлорофилла *a* $Y(NO)$ практически не изменялся в результате заражения проростков *Hordeum vulgare* L.

Fusarium culmorum, а при воздействии повышенной температуры (40°C, 3 часа) статистически не достоверно повышался начиная с третьих суток. При совместном воздействии стрессоров (*Fusarium culmorum* и повышенной температуры) $Y(NO)$ повышался с первых суток и к 8-ому дню наблюдения достигал $129,3 \pm 13,8$ % от контроля. Полученные данные указывают на нарушение процессов диссипации энергии электронного возбуждения молекул хлорофилла в антенне ФС2 или светособирающем комплексе ФС2.

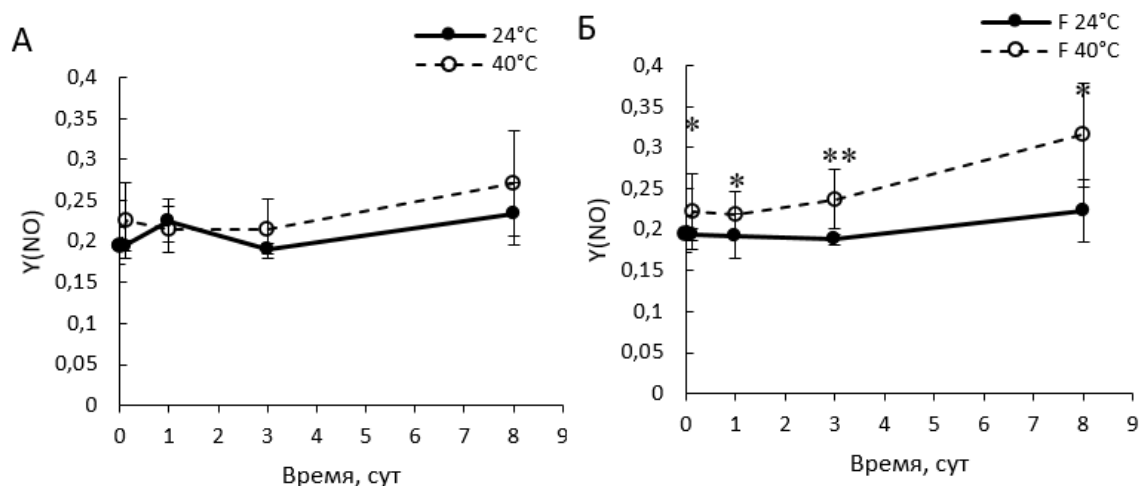


Рис. 4. Кинетика квантового выхода нерегулируемого тепловыделения и излучения флуоресценции хлорофилла *a* при периодическом воздействии повышенной температуры (40°C, 3 ч) в необработанных (А) и зараженных *Fusarium culmorum* (Б) проростках *Hordeum vulgare* L.; * - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$

Таким образом, установлено, что совместное воздействие стрессовых факторов (повышенной температуры (40°C 3 ч) и заражение *Fusarium culmorum*) ускоряет развитие трахеомикозного увядания, а также подавляет фотосинтетическую активность *Hordeum vulgare* L., что выражается в снижении эффективного квантового выхода фотохимических реакций ФС2, подавлении нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла за счет его светоиндуцированного компонента и повышении нерегулируемого нефотохимического тушения.

Библиографические ссылки

1. Reynolds, M.P. Application of Physiology in Wheat Breeding / M.P. Reynolds, J.I. Ortiz-Monasterio, A. McNab. – 2017.
2. SEPTORIA ON CEREALS AND ITS HARMFUL EFFECT / N.A. Krupenko [et al.] // Proc. Natl. Acad. Sci. Belarus Agrar. Ser. – 2017. – Vol. 0, № 4. – P. 66-75.
3. *Fusarium culmorum*: causal agent of foot and root rot and head blight on wheat / B. Scherm [et al.] // Mol. Plant Pathol. – 2013. – Vol. 14, № 4. – P. 323-341.