

УДК 581.1

УЧАСТИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ИНДУЦИРОВАННИИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕОПТИЛЕЙ ПШЕНИЦЫ ЭКЗОГЕННЫМИ БРАССИНОСТЕРОИДАМИ

© 2013 г. А. А. Вайнер¹, Ю. Е. Колупаев¹,
Т. О. Ястреб¹, В. А. Хрипач²

¹*Харьковский национальный аграрный университет им. В.В. Докучаева
(Харьков, Украина)*

²*Институт биоорганической химии
Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Беларусь)*

Исследовали влияние экзогенных brassinosteroidов 24-эпибрасинолида и 24-эпикастастерона на генерацию активных форм кислорода (АФК) и устойчивость coleoptiles пшеницы (*Triticum aestivum* L.) к повреждающему прогреву. Под влиянием brassinosteroidов происходило транзитное усиление генерации супероксидного анион-радикала ($O_2^{\cdot-}$) и повышение содержания пероксида водорода в coleoptiles пшеницы. Оба brassinosteroidа в концентрации 1-10 нМ повышали выживание coleoptiles после их прогрева в водяном термостате (43°C, 10 мин). Антиоксидант ионол (бутилгидрокситолуол) и ингибитор НАДФН-оксидазы (имидазол) устраняли вызываемое brassinosteroidами усиление генерации $O_2^{\cdot-}$ coleoptiles пшеницы и препятствовали индуцированию их теплоустойчивости. Сделано заключение о роли АФК, генерируемых с участием НАДФН-оксидазы, в реализации стресс-протекторного действия экзогенных brassinosteroidов.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., brassinosteroidы, активные формы кислорода, НАДФН-оксидаза, теплоустойчивость

Экзогенные brassinosteroidы и их синтетические аналоги повышают устойчивость растений ко многим абиотическим и биотическим стресс-факторам (Khrpach et al., 2000; Bajguz, 2012), в т.ч. к тепловому шоку. Такие эффекты получены в экспериментах с растениями арабидопсиса (Divi et al., 2008), капусты (Kumar et al., 2012), томатов (Ogweno et al., 2008; Mazona et al., 2011; Nie et al., 2013), вигны (Nayat et al., 2010) и др. Менее исследовано стресс-протекторное влияние brassinosteroidов на однодольные растения. Показано повышение интенсивности биосинтеза белка в листьях пшеницы в условиях теплового (Kulaeva et al., 1991) и в мезокотилеях кукурузы в условиях холодого (Skatерная и др., 2012) стрессов. Также выявлена индукция brassino-

стероидами синтеза белков с шаперонными функциями (Skатерная и др., 2012). Имеются сведения о повышении устойчивости проростков и взрослых растений пшеницы к солевому стрессу под влиянием 24-эпибрасинолида (Авальбаев и др., 2010; Talaat et al., 2012). В то же время в работе Shahbaz et al. (2008) показано отсутствие положительного влияния 24-эпибрасинолида на рост солечувствительного сорта пшеницы в условиях засоления. Есть основания полагать, что физиологические эффекты brassinosteroidов могут зависеть от видовых и даже сортовых особенностей растений (Shahbaz et al., 2008; Yusuf et al., 2011).

Установлено, что действие brassinosteroidов реализуется с участием ряда сигнальных и гормональных посредников. Так, показана роль активных форм кислорода (АФК) и MAP-киназного каскада в индуцировании brassinosteroidами устойчивости растений огурца к тепловому и фотоокислительному стрессам (Xia et al., 2009). Установлено, что в индуциро-

Адрес для корреспонденции: Колупаев Юрий Евгеньевич, Харьковский национальный аграрный университет им. В.В.Докучаева, п/о «Коммунист-1», Харьков, 62483, Украина;
e-mail: plant_biology@mail.ru

УЧАСТИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА

вании устойчивости огурца к холодовому стрессу и параквату задействован также оксид азота как сигнальный посредник (Cui et al., 2011).

Целью настоящей работы явилось сравнительное исследование влияния 24-эпибрасинолида и 24-эпикастастерона, относящихся соответственно к 7-оксалактонам и к 6-оксотипу брасиностероидов и отличающихся по биологической активности (Вајгуз, 2012), на теплоустойчивость колеоптилей пшеницы. Изолированные колеоптили являются моделью, чувствительной к действию экзогенных стрессовых фитогормонов (Колупаев и др., 2013). В задачу исследования входило также выяснение участия АФК в реализации физиологических эффектов исследуемых брасиностероидов.

МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования использовали отрезки колеоптилей пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Элегия, которые отделяли от 4-суточных этиолированных проростков, выращенных при температуре 20°C. Подготовка растительного материала описана ранее (Колупаев и др., 2012; 2013).

Колеоптили инкубировали на простерилизованном 2% растворе сахарозы с добавлением пенициллина (Na-соль, 100000 ед.) (контроль). Для исследований использовали 24-эпибрасинолид и 24-эпикастастерон, синтезированные в лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси. Исследуемые брасиностероиды вносили в среду инкубации колеоптилей соответствующих вариантов. В отдельных вариантах в нее добавляли антиоксидант ионол (бутилгидрокситолуол) или ингибитор НАДФН-оксидазы имидазол либо комбинации этих соединений с брасиностероидами. В этом случае эффекторы вносили в среду инкубации колеоптилей за 3 ч до введения в нее брасиностероидов. Брасиностероиды предварительно растворяли в небольшом объеме этанола. В вариантах без брасиностероидов в инкубационную среду добавляли эквивалентное количество этанола.

После 20 ч инкубации колеоптилей на растворах исследуемых соединений часть отрезков каждого варианта подвергали потенциально летальному прогреву в водяном ультратермостате в стерильной дистиллированной воде при температуре $43 \pm 0,1^\circ\text{C}$ в течение 10 мин. Затем колеоптили помещали в чашки Петри с простерилизованным 2% раствором саха-

розы с добавлением пенициллина. Через 2 сут после прогрева оценивали их повреждения по появлению специфического оттенка, обусловленного инфильтрацией тканей, и потере тургора.

Продукцию супероксидных анион-радикалов интактными колеоптилями определяли по восстановлению нитросинего тетразолия (НСТ) по методике, подробно описанной ранее (Колупаев и др., 2013). Для проверки специфичности генерации $\text{O}_2^{\cdot-}$ в специальных опытах в пробы добавляли СОД (50 ед./мл). СОД ингибировала генерацию супероксидного анион-радикала не менее, чем на 90%. При этом полагали, что количество восстановленного НСТ определяется генерацией $\text{O}_2^{\cdot-}$. Супероксид-продуцирующую активность оценивали как изменение светопоглощения A_{530} реакционной смеси за 1 ч инкубации в расчете на один отрезок колеоптиля. За 100% принимали величину в контрольном варианте в первой временной точке наблюдений.

Содержание пероксида водорода определяли ферроцианидным методом, экстрагируя его из растертых на холоде колеоптилей 5% ТХУ (Sagisaka, 1976). Пробы центрифугировали при 8000 g в течение 10 мин при температуре не более 4°C и в супернатанте определяли концентрацию H_2O_2 с использованием соли Мора и тиоцианата аммония (Sagisaka, 1976).

Опыты проводили в трехкратной биологической повторности и воспроизводили независимо не менее трех раз. На рисунках приведены средние значения и их стандартные отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предобработка колеоптилей растворами 24-эпибрасинолида и 24-эпикастастерона в концентрациях 1-10 нм повышала теплоустойчивость колеоптилей пшеницы (рис. 1). Достоверных различий в эффектах двух брасиностероидов выявить не удалось.

В связи с имеющимися данными о возможном участии АФК как сигнальных посредников в реализации физиологических эффектов брасиностероидов (Xia et al., 2009) исследовали их влияние на генерацию супероксидного анион-радикала колеоптилями пшеницы. Оба брасиностероида вызывали усиление генерации $\text{O}_2^{\cdot-}$ колеоптилями пшеницы на 15-30% относительно контроля в течение первых 1-5 ч наблюдений, к 20 ч их эффекты уменьшались (рис. 2, А).

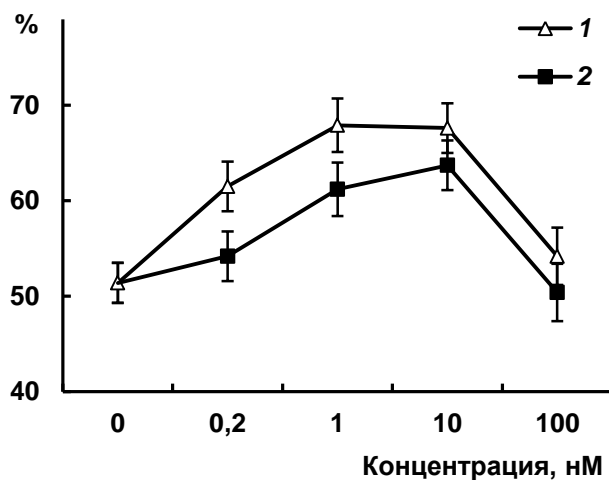


Рис. 1. Влияние brassinosterоидов на выживание (%) coleоптилей пшеницы после повреждающего прогрева (10 мин при температуре 43°C).

1 – 24-эпибрассинолид; 2 – 24-эпикастастерон.

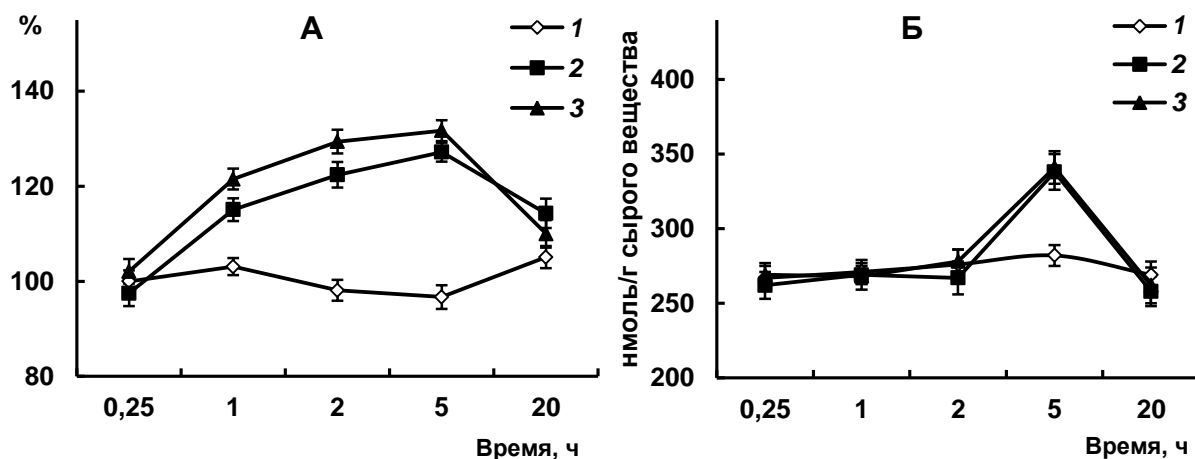


Рис. 2. Временная динамика генерации супероксидного анион-радикала (% к величине в первой временной точке контрольного варианта) (А) и содержания пероксида водорода (нмоль/г сырого вещества) (Б) в coleоптилях пшеницы.

1 – контроль; 2 – 24-эпибрассинолид (10 нМ); 3 – 24-эпикастастерон (10 нМ).

Под влиянием 24-эпибрассинолида и 24-эпикастастерона также наблюдалось транзитное увеличение содержания пероксида водорода в coleоптилях пшеницы (рис. 2,Б). Однако оно фиксировалось только через 5 ч после начала обработки coleоптилей brassinosterоидами.

Для выяснения роли АФК в реализации стресс-протекторного действия 24-эпибрассинолида и 24-эпикастастерона исследовали влияние антиоксиданта ионола на проявление эффектов этих brassinosterоидов. В данной серии опытов продукцию супероксидного анион-радикала определяли через 2 и 5 ч после начала обработки coleоптилей brassinosterоидами – во временные отрезки, в которых

наблюдалось наиболее заметное влияние препаратов на количество супероксидных анион-радикалов, образуемых растительными клетками. Предобработка coleоптилей скавенжером радикальных АФК ионолом вызывала снижение количества супероксидного анион-радикала, выявляемого в среде инкубации (рис. 3). В вариантах с сочетанием действия brassinosterоидов и ионола количество выявляемого $O_2^{\cdot -}$ было значительно ниже, чем в вариантах с обработкой coleоптилей только brassinosterоидами.

Одним из основных ферментов, обуславливающих генерацию АФК поверхностью растительных клеток, является НАДФН-оксидаза (Глянько и др., 2009; Marino et al., 2012). Как

УЧАСТИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА

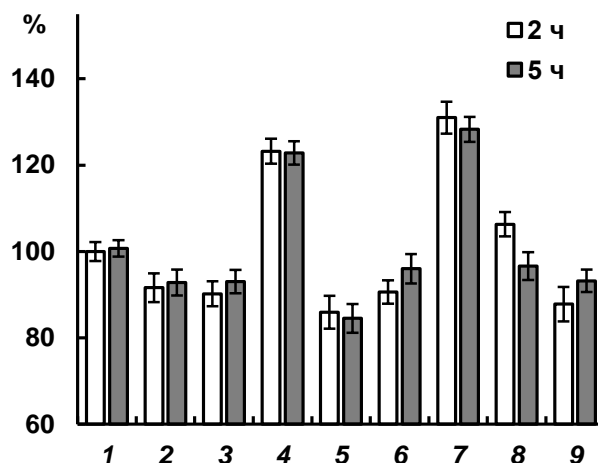


Рис. 3. Влияние ионола, имидазола и brassinостероидов, на генерацию супероксидного анион-радикала coleoptилями пшеницы (% к величине в первой временной точке контрольного варианта).

Здесь и на рис. 4: 1 – контроль; 2 – ионол (5 мкМ); 3 – имидазол (1 мкМ); 4 – 24-эпибрасинолид (10 нМ); 5 – 24-эпибрасинолид (10 нМ) + ионол (5 мкМ); 6 – 24-эпибрасинолид (10 нМ) + имидазол (1 мкМ); 7 – 24-эпикастастерон (10 нМ); 8 – 24-эпикастастерон (10 нМ) + ионол (5 мкМ); 9 – 24-эпикастастерон (10 нМ) + имидазол (1 мкМ).

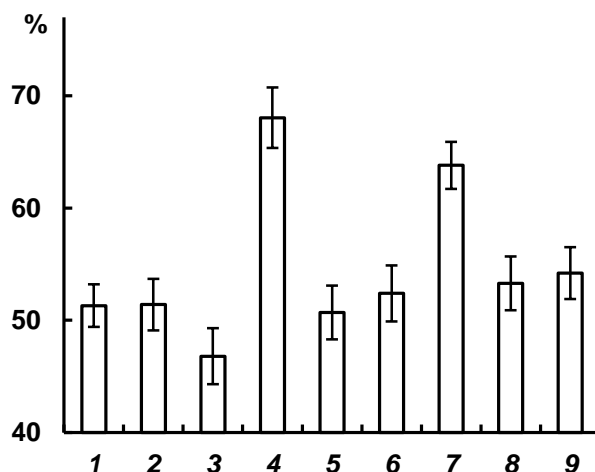


Рис. 4. Влияние ионола, имидазола и brassinостероидов на выживание (%) coleoptилей пшеницы после повреждающего прогрева (10 мин при температуре 43°C).

Обозначения, как на рис. 3.

уже отмечалось, на растениях огурца ранее был показан эффект повышения активности НАДФН-оксидазы под влиянием 24-эпибрасинолида (Xia et al., 2009). В наших экспериментах обработка coleoptилей ингибитором НАДФН-оксидазы имидазолом полностью снимала эффект усиления генерации $O_2^{\cdot -}$, вызываемый 24-эпибрасинолидом и 24-эпикастастероном (рис. 3). Следовательно, есть основания полагать, что усиление генерации АФК coleoptилями пшеницы под влиянием

brassinостероидов связано с активацией НАДФН-оксидазы.

Установлено, что индуцируемое обработкой brassinостероидом повышение устойчивости растений огурца к холоду и параквату угнеталось предобработкой ингибитором НАДФН-оксидазы дифенилениодонием или антиоксидантом диметилтиомочевинной (Xia et al., 2009). По-видимому, зависимое от НАДФН-оксидазы усиление генерации АФК, вызываемое brassinостероидами, необходимо и для реализации их стресс-протекторного действия

на колеоптили пшеницы. В наших экспериментах как антиоксидант ионол, так и ингибитор НАДФН-оксидазы имидазол в значительной степени нивелировали положительное влияние 24-эпибрассинолида и 24-эпикастастерона на теплоустойчивость колеоптилей пшеницы (рис. 4). При этом сами по себе ионол и имидазол не оказывали достоверного влияния на теплоустойчивость колеоптилей пшеницы.

Таким образом, можно полагать, что АФК задействованы как сигнальные посредники в процессе индуцирования теплоустойчивости клеток колеоптилей пшеницы экзогенными brassinosterоидами. С помощью АФК активируются многие защитные реакции растений, в частности, транзиторное повышение их содержания (в пределах физиологических концентраций) приводит к индуцированию антиоксидантной системы (Demidchik, 2012).

Обсуждая полученные результаты, можно утверждать, что одним из основных продуцентов сигнальных АФК является НАДФН-оксидаза, по крайней мере, в рамках используемой экспериментальной модели. Так, ингибитор НАДФН-оксидазы имидазол полностью снимал стимулированное brassinosterоидами образование супероксидного анион-радикала колеоптилями пшеницы (рис. 3). Наряду с этим, ингибирование НАДФН-оксидазы препятствовало проявлению в условиях повреждающего прогрева защитного действия на колеоптили обоих исследуемых brassinosterоидов (рис. 4). Ранее в экспериментах, выполненных на колеоптилях пшеницы, нами показано участие этого фермента в реализации стресс-протекторного действия двух других «стрессовых» фитогормонов – салициловой (Колупаев и др., 2012) и жасмоновой (Карпец и др., 2013) кислот. Вполне естественно, что при этом нельзя полностью исключить и участие других ферментов, которые могут быть потенциальными продуцентами АФК, в частности, внеклеточных пероксидаз (Minibaeva et al., 2009) и аминоксидаз (Neill et al., 2002).

Можно полагать, что пероксид водорода, образование которого усиливается под влиянием brassinosterоидов, выступает в роли «сигнального узла» (Petrov, Van Breusegem 2012), задействованного в регуляции других сигнальных путей. Так, на растениях огурца показано, что повышение содержания АФК под влиянием brassinosterоидов необходимо для последующей активации MAP-киназного каскада (Xia et al., 2009).

С другой стороны, активация НАДФН-оксидазы, как правило, происходит с участием кальция (Глянько и др., 2009; Demidchik, 2012). В регуляции ее активности может быть задействована и фосфатидная кислота (Marino et al., 2012) – важный посредник липидного сигналинга. Роль этих компонентов клеточного сигналинга в реализации физиологических, в частности, стресс-протекторных эффектов brassinosterоидов пока остается малоисследованной.

ЛИТЕРАТУРА

- Авальбаев А.М., Юлдашев Р.А., Фатхутдинова Р.А., Урусов Ф.А., Сафутдинова Ю.В., Шакирова Ф.М. Влияние 24-эпибрассинолида на гормональный статус растений пшеницы при действии хлорида натрия // Прикл. биохимия и микробиология. – 2010. – Т. 46, № 1. – С. 109-112.
- Глянько А.К., Ищенко А.А., Митанова Н.Б., Васильева Г.Г. НАДФН-оксидаза растений // Вісн. Харків. націон. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія. – 2009. – Вип. 2 (17). – С. 6-18.
- Карпец Ю.В., Колупаев Ю.Е., Ястреб Т.О., Обозный А.И., Швиденко Н.В., Луговая А.А., Вайнер А.А. Активные формы кислорода и ионы Са как возможные посредники при индуцировании теплоустойчивости растительных клеток жасмоновой кислотой // Укр. біохім. журн. – 2013. – Т. 85, № 3. – С. 62-68.
- Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В., Ястреб Т.О. Колеоптили пшеницы как модельный объект для исследования стресс-протекторного действия экзогенных соединений // Вісн. Харків. нац. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія. – 2013. – Вип. 1 (28). – С. 103-108.
- Колупаев Ю.Е., Ястреб Т.О., Швиденко Н.В., Карпец Ю.В. Индукция теплоустойчивости колеоптилей пшеницы салициловой и янтарной кислотами: связь эффектов с образованием и обезвреживанием активных форм кислорода // Прикл. биохимия и микробиология. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 550-556.
- Скатерная Т.Д., Харченко О.В., Кретинин С.В., Кочич В.Н., Литвиновская Р.П., Чащина Н.М., Хрипач В.А., Кравец В.С. Влияние 24-эпибрассинолида на биосинтез белка в проростках кукурузы при холодном стрессе // Доклады НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 2. – С. 63-68.
- Vajguz A. Origin of brassinosteroids and their role in oxidative stress in plants // Phytohormones and abiotic stress tolerance in plants / Eds. N.A. Khan et al. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – P. 169-183.
- Cui J.X., Zhou Y.H., Ding J.G., Xia X.J., Shi K., Chen S.C., Asami T., Chen Z., Yu J.Q. Role of nitric oxide in hydrogen peroxide-dependent induction of abiotic stress tolerance by brassinosteroids in cucumber // Plant Cell Environ. – 2011. – V. 34. – P. 347-358.

УЧАСТИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА

- Demidchik V. Reactive oxygen species and oxidative stress in plants // Plant stress physiology / Ed. S. Shabala. – CAB International, 2012. – P. 24-58.
- Divi U.K., Rahman T., Krishna P. Brassinosteroid-mediated stress tolerance in Arabidopsis shows interactions with abscisic acid, ethylene and salicylic acid pathways // BMC Plant Biology. – 2010. – V. 10; doi: 10.1186/1471-2229-10-151
- Hayat S., Maheshwari P., ShafiWani A., Irfan M., Alyemini M.N., Ahmad A. Comparative effect of 28 homobrassinolide and salicylic acid in the amelioration of NaCl stress in *Brassica juncea* L. // Plant Physiol. Biochem. – 2012. – V. 53. – P. 61-68.
- Khripach V., Zhabinskii V., De Groot A. Twenty years of brassinosteroids: Steroidal plant hormones warrant better crops for the XXI century // Ann. Bot. – 2000. – V. 86. – P. 441-447.
- Kulaeva O.N., Burkhanova E.A., Fedina A.B., Khokhlova V.A., Bokebayeva G.A., Vorbrodt H.M., Adam G. Effect of brassinosteroids on protein synthesis and plant-cell ultrastructure under stress conditions // Brassinosteroids / Ed. H.Cutler. – Washington: DC, American Chemical Society, 1991. – P. 141-155.
- Kumar S., Sirhindi G., Bhardwaj R., Kumar M., Arora P. Role of 24-epibrassinolide in amelioration of high temperature stress through antioxidant defense system in *Brassica juncea* L. // Plant Stress. – 2012. – V. 6, № 1. – P. 55-58.
- Marino D., Dunand C., Puppo A., Pauly N. A burst of plant NADPH oxidases // Trends Plant Sci. – 2012. – V. 17, № 1. – P. 9-15.
- Mazorra L.M., Holton N., Bishop G.J., Núñez M. Heat shock response in tomato brassinosteroid mutants indicates that thermotolerance is independent of brassinosteroid homeostasis // Plant Physiol. Biochem. – 2011. – V. 49. – P. 1420-1428.
- Minibayeva F., Kolesnikov O., Chasov A., Beckett R.P., Lüthje S., Vylegzhanina N., Buck F., Böttger M. Wound-induced apoplastic peroxidase activities: their roles in the production and detoxification of reactive oxygen species // Plant Cell Environ. – 2009. – V. 32. – P. 497-508.
- Neill S.J., Desikan R., Clarke A., Hurst R.D., Hancock J.T. Hydrogen peroxide and nitric oxide as signalling molecules in plants // J. Exp. Bot. – 2002. – V. 53. – P. 1237-1247.
- Nie W.F., Wang M.M., Xia X.J., Zhou Y.H., Shi K., Chen Z., Yu J.Q. Silencing of tomato RBOH1 and MPK2 abolishes brassinosteroid-induced H₂O₂ generation and stress tolerance // Plant Cell Environ. – 2013. – V. 36. – P. 789-803.
- Ogweno J. O., Song X.S., Shi K., Hu W.H., Mao W. H., Zhou Y.H. Yu J.Q., Noguees S. Brassinosteroids alleviate heat-induced inhibition of photosynthesis by increasing carboxylation efficiency and enhancing antioxidant systems in *Lycopersicon esculentum* // J. Plant Growth Regul. – 2008. – V. 27. – P. 49-57.
- Petrov V.D., Breusegem F.V. Hydrogen peroxide – a central hub for information flow in plant cells // AoB Plants – 2012. – pls014; doi:10.1093/aobpla/pls014
- Sagisaka S. The occurrence of peroxide in a perennial plant, *Populus gelrica* // Plant Physiol. – 1976. – V. 57. – P. 308-309.
- Shahbaz M., Ashraf M., Athar H.R. Does exogenous application of 24-epibrassinolide ameliorate salt induced growth inhibition in wheat (*Triticum aestivum* L.)? // Plant Growth Regul. – 2008. – V. 55. – P. 51-64.
- Talaat N.B., Shawky B.T. 24-Epibrassinolide ameliorates the saline stress and improves the productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.) // Environ. Exp. Bot. – 2012. – V. 82. – P. 80-88.
- Xia X.J., Wang Y.J., Zhou Y.H., Tao Y., Mao W.H., Shi K., Asami T., Chen Z., Yu J.Q. Reactive oxygen species are involved in brassinosteroids-induced stress tolerance in *Cucumis sativus* // Plant Physiol. – 2009. – V. 150. – P. 801-814.
- Yusuf M., Fariduddin Q., Hayat S., Hasan S.A., Ahmad A. Protective response of 28-homobrassinolide in cultivars of *Triticum aestivum* with different levels of Nickel // Arch. Environ. Contam. Toxicol. – 2011. – V. 60. – P. 68-76.

Поступила в редакцию
30.09.2013 г.

УЧАСТИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА

THE PARTICIPATION OF REACTIVE OXYGEN SPECIES IN THE INDUCTION OF THERMOTOLERANCE OF WHEAT COLEOPTILES CAUSED BY EXOGENOUS BRASSINOSTEROIDS

A. A. Vayner¹, Yu. E. Kolupaev¹, T. O. Yastreb¹, V. A. Khripach²

*V.V. Dokuchaev Kharkiv National Agrarian University
(Kharkiv, Ukraine)
Institute of Bioorganic Chemistry
National Academy of Sciences of Byelorussia
(Minsk Byelorussia)*

The effect of exogenous brassinosteroids such as 24-epibrassinolide and 24-epicastasterone on reactive oxygen species (ROS) generation and wheat coleoptiles resistance (*Triticum aestivum* L.) to the damaging heating was investigated. of brassinosteroid. There was a transient enhancement of superoxide anion radical ($O_2^{\cdot-}$) generation and increase in the content of hydrogen peroxide in wheat coleoptiles under the influence of brassinosteroids. Both brassinosteroids in the concentration of 1-10 nM increased the survival of coleoptiles after their heating in water thermostate (43°C, 10 min). Antioxidant ionol (butylhydroxytoluene) and an inhibitor of NADPH oxidase (imidazole) eliminated the enhancement of $O_2^{\cdot-}$ generation in wheat coleoptiles and prevented the induction of heat resistance caused by brassinosteroids. The conclusion about the role of ROS generated with the participation of NADPH oxidase in the implementation of the stress-protective effect of exogenous brassinosteroids has been made.

Key words: *Triticum aestivum* L., brassinosteroids, reactive oxygen species, NADPH oxidase, thermotolerance

УЧАСТЬ АКТИВНИХ ФОРМ КИСНЮ В ІНДУКУВАННІ ТЕПЛОСТІЙКОСТІ КОЛЕОПТИЛІВ ПШЕНИЦІ ЕКЗОГЕННИМИ БРАССИНОСТЕРОЇДАМИ

A. O. Vayner¹, Yu. E. Kolupaev¹, T. O. Yastreb¹, V. O. Khripach²

¹*Харківський національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва
(Харків, Україна)*
²*Інститут біоорганічної хімії
Національної академії наук Білорусі
(Мінськ, Білорусь)*

Досліджували вплив екзогенних брассиностероїдів 24-епібрассиноліду і 24-епікастастерону на генерацію активних форм кисню (АФК) і стійкість колеоптилів пшениці (*Triticum aestivum* L.) до ушкоджуючого прогріву. Під впливом брассиностероїдів відбувалося транзиторне посилення генерації супероксидного аніон-радикала ($O_2^{\cdot-}$) і підвищення вмісту пероксиду водню в колеоптилях пшениці. Обидва брассиностероїди в концентрації 1-10 нМ підвищували виживаність колеоптилів після їх прогріву у водяному термостаті (10 хв, 43°C). Антиоксидант іонол (бутилгідрокситолуол) та інгібітор НАДФН-оксидази (імідазол) усували спричинюване брассиностероїдами посилення генерації $O_2^{\cdot-}$ колеоптилями пшениці і перешкождали розвитку їх теплостійкості. Зроблено висновок про роль АФК, що генеруються за участю НАДФН-оксидази, в реалізації стрес-протекторної дії екзогенних брассиностероїдів.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., брассиностероїди, активні форми кисню, НАДФН-оксидаза, теплостійкість