

УДК 581.144.2:576.3+58.031

## **ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ Ni<sup>2+</sup> І ГІПЕРТЕРМІЇ НА ВМІСТ ВІДНОВЛЕНОГО ГЛУТАТІОНУ І АКТИВНІСТЬ ГЛУТАТІОН-S-ТРАНСФЕРАЗИ У КОРЕНЯХ КУКУРУДЗИ ТА ГОРОХУ**

© 2012 р. Н. О. Хромих<sup>1</sup>, Є. С. Бородай<sup>2</sup>, Ю. В. Лихолат<sup>2</sup>

*Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара*

<sup>1</sup>*Науково-дослідний інститут біології*

<sup>2</sup>*Кафедра фізіології та інтродукції рослин*

*(Дніпропетровськ, Україна)*

У планованому факторному експерименті досліджено зміни вмісту відновленого глутатіону (GSH) та активності глутатіон-S-трансферази (GST) у коренях 5-добових проростків кукурудзи (*Zea mays* L.) та гороху (*Pisum sativum* L.) за 30-хвилинного сумісного впливу нітрату нікелю в діапазоні концентрацій 0,1-1,0 мМ та гіпертермії в діапазоні 32-45°C. Виявлено ефект взаємодії впливу Ni<sup>2+</sup> і гіпертермії на вимірювані показники. Показано видову специфічність дії кожного чинника та ефекту їх взаємодії у коренях проростків кукурудзи та гороху.

**Ключові слова:** *Zea mays, Pisum sativum, корені, іони нікелю, гіпертермія, відновлений глутатіон, глутатіон-S-трансфераза, факторний експеримент*

За сучасних екологічних умов дія гіпертермії на рослини нерідко супроводжується впливом на них інших чинників, у тому числі важких металів. Для вивчення сумісної дії відповідним методичним підходом є факторний аналіз, який дає можливість оцінити роль кожного з чинників та ефект їхньої взаємодії (Адлер, 2009). Важкі метали належать до найбільш небезпечних забруднювачів середовища (Chaney et al., 2005), а нікель, попри невеликий вміст у ґрунті, має суттєвий вплив на чисельні процеси у рослинах (Llamas et al., 2008), зокрема, пригнічує розвиток бічних коренів у проростків кукурудзи (Серегин и др., 2003).

Особливість токсичної дії іонів нікелю зумовлена відсутністю у рослин фізіологічних бар'єрів для їх проникнення в центральний циліндр та транспортування у пагони (Серегин и др., 2008). Зазначені обставини вказують на вирішальну роль клітинних метаболічних механізмів, функціонування яких забезпечує здат-

ність рослин до детоксикації Ni<sup>2+</sup>. У рослин-гіперакумуляторів показано високу спорідненість нікелю до органічних кислот (Bhatia et al., 2005) та N-вмісних лігандів, зокрема, до гістидину (Ingle et al., 2005), нікотинаміну (Magi et al., 2006), відновленого глутатіону (Freeman et al., 2004). У коренях рослин-вилучачелів виявлено досить швидку реакцію глутатіон-залежної системи на вплив важких металів (Cuypers et al., 2001; Haluskova et al., 2009), але ефект Ni<sup>2+</sup> детально досліджено лише після 6-ти та 10-добового впливу на корені гороху і кукурудзи (Сищиков, Гришко, 2003). Важлива роль глутатіон-залежної системи показана також у ланцюгу відповідних реакцій на вплив високої температури, зокрема, у листках яблуні (Ma et al., 2008), листках і коренях *Phalaenopsis* (Babar et al., 2005), коренях ячменю (Haluskova et al., 2009). Сумісна дія вказаних абіотичних чинників не вивчалась, тож метою планованого факторного експерименту було виявлення у коренях кукурудзи та гороху змін пулу GSH та активності GST, зумовлених ефектом взаємодії Ni<sup>2+</sup> і високої температури на ранньому етапі їх комбінованого впливу.

---

*Адреса для кореспонденції:* Хромих Ніна Олександрівна, НДІ біології Дніпропетровського національного університету ім. Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, 49050, Україна;  
e-mail: Khromykh2012@gmail.com

**МЕТОДИКА**

У попередніх дослідженнях за окремого короткочасного впливу високої температури та нітрату нікелю достовірно зростання вмісту GSH та активності GST у коренях рослин виявлено при концентраціях розчинів, більших від 0,05 мМ, та температурах середовища, вищих за 30°C, що визначило вибір експериментальних умов для вивчення сумісної дії чинників.

Насіння кукурудзи (*Zea mays* L.) гібрида Оржиця 237 МВ та гороху (*Pisum sativum* L.) сорту Харківський пророщували на дистильованій воді при 26°C, надалі 5-добові етіоловані проростки пересаджували у розчини нітрату нікелю та піддавали дії високої температури повітря (прогрівання у термостатованій шафі) за схемою двофакторного експерименту (табл. 1).

Корені проростків кукурудзи та гороху відбирали після 30 хв сумісного впливу чинників. Вміст GSH у небілковій фракції екстрактів з коренів проростків та активність GST в екстрактах визначали методами, які описані раніше (Хромих та ін., 2011).

Отримані у триразовому повторенні результати опрацьовано за допомогою програми Manugistics StatGraphics Plus v 5.1 Enterprise.

**РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ**

У коренях експериментальних рослин обох видів вміст відновленого глутатіону та активність глутатіон-S-трансферази перевищували контрольні показники (табл. 1).

Згідно з алгоритмом факторного аналізу (Максимов, 1980), зміни вмісту GSH та активності GST оцінювали відносно нульового значення (вільного члена рівняння регресії), розрахованого програмою.

У коренях проростків кукурудзи ефект іонів нікелю був спрямований на зростання вмісту GSH, тоді як ефекти гіпертермії та взаємодії чинників спричиняли тенденцію до його зниження (рис. 1).

Динаміку вмісту GSH у коренях кукурудзи відображено математичною моделлю, яка врахувала 70,1% отриманих даних і адекватно характеризувала процес (табл. 2).

Аналіз рівняння регресії свідчить, що при зростанні концентрації  $Ni^{2+}$  у середовищі від мінімальної до максимальної на фоні нижчої температури вміст GSH у коренях кукурудзи збільшувався на 10,5% від нульового значення,

тоді як на фоні максимальної температури – знижувався на 1,6%. Зростання температури середовища за мінімальної й максимальної концентрацій  $Ni^{2+}$  супроводжувалося зниженням вмісту відновленого глутатіону на 24% та 36% відповідно. Ефект взаємодії чинників зумовлював зменшення вмісту GSH на 6,1%.

Активність глутатіон-S-трансферази у коренях кукурудзи достовірно зростала внаслідок дії кожного з чинників (рис. 2).

Аналіз математичної моделі, яка врахувала 87,1% даних (табл. 2), показав, що зростання вмісту  $Ni^{2+}$  у середовищі за обох значень температури супроводжувалося збільшенням активності GST (на 4,8 та 0,9% відповідно). Зростання температури середовища сприяло активації ферменту на 8,1% та 4,2%, відповідно за мінімального та максимального вмісту  $Ni^{2+}$ . Ефект взаємодії чинників призводив до зниження активності GST у коренях кукурудзи на 1,9% відносно нульового значення.

У коренях гороху через 30 хв експерименту при загальній позитивній спрямованості дії чинників на вміст відновленого глутатіону, статистично достовірним був лише ефект взаємодії факторів (рис. 3).

Аналіз математичної моделі, в якій враховано 84,4 % даних (табл. 3), виявив, що зростання концентрації  $Ni^{2+}$  за мінімальної температури супроводжувалося зменшенням вмісту GSH на 21,6%, тоді як за максимальної – зростанням на 38,7%. Підвищення температури середовища за низької концентрації  $Ni^{2+}$  зумовлювало зниження вмісту GSH на 27,7%, а за високої концентрації – його збільшення на 32,6%. Ефект взаємодії чинників спричинював зростання пулу GSH у коренях гороху на 30,1%.

Динаміка активності GST у коренях гороху визначалася негативним ефектом температури та позитивним ефектом іонів нікелю (рис. 4).

Аналіз математичної моделі, яка врахувала 92,6% даних (табл. 3), свідчить, що збільшення вмісту  $Ni^{2+}$  у середовищі супроводжувалося незначною активацією ферменту за мінімальної та максимальної температури. Зростання температури середовища спричинювало зниження активності GST на 17,6% за мінімального вмісту  $Ni^{2+}$  та на 12,8% за максимального вмісту. Ефект взаємодії чинників зумовлював зростання активності ферменту у коренях гороху на 2,4%.

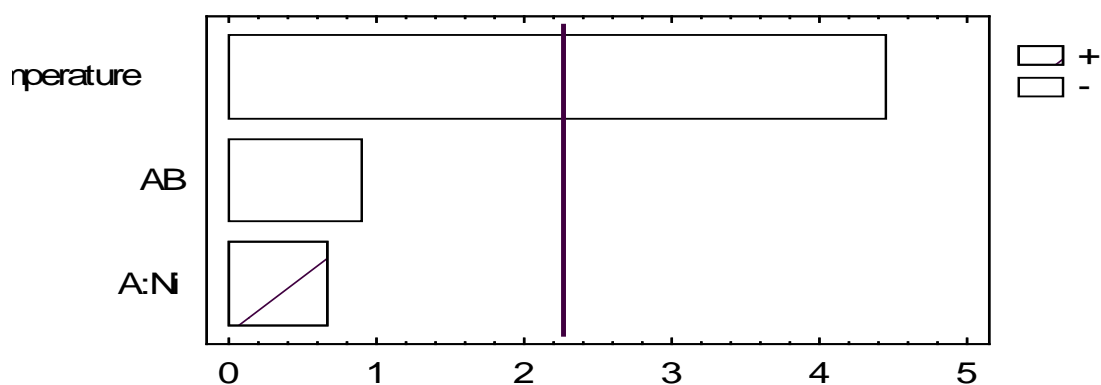
## ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ

**Таблиця 1. Сумісний вплив  $Ni^{2+}$  і гіпертермії на вміст GSH та активність GST у коренях проростків**

Концентрація $Ni(NO_3)_2$ , мМ	Температура повітря, °С	Вміст GSH (мкмоль/г), $M \pm m$	Активність GST (нкат/г), $M \pm m$
Корені проростків кукурудзи			
Контроль ( $H_2O$ )	26,0	13,6±1,31	15,6±0,18
0,1	32,0	22,2±1,21	19,5±0,31
1,0	32,0	24,0±1,04	20,4±0,35
0,1	45,0	17,3±1,43	21,1±0,13
1,0	45,0	16,9±1,22	21,3±0,11
0,55	38,5	25,4±1,34	20,9±0,24
Корені проростків гороху			
Контроль ( $H_2O$ )	26,0	7,8±0,36	3,3±0,14
0,1	32,0	17,5±0,43	4,8±0,10
1,0	32,0	14,2±0,25	4,9±0,11
0,1	45,0	13,2±0,45	4,0±0,04
1,0	45,0	19,0±0,38	4,3±0,14
0,55	38,5	13,8±0,40	4,2±0,03

**Таблиця 2. Динаміка вмісту GSH (1) та активності GST (2) у коренях кукурудзи за сумісного впливу  $Ni^{2+}$  (A) та гіпертермії (B)**

№	$R^2$ , %	Математична модель (рівняння регресії)	Ефекти впливу $Ni^{2+}$	Ефекти впливу гіпертермії	Ефект взаємодії факторів
1	70,1	$y = 21,47 + 0,48a - 3,23b - 0,65ab$	$A^- = 2,26$ $A^+ = -0,34$	$B^- = -5,16$ $B^+ = -7,76$	$AB = -1,3$
2	87,1	$y = 20,63 + 0,29a + 0,63b - 0,2ab$	$A^- = 0,98$ $A^+ = 0,18$	$B^- = 1,66$ $B^+ = 0,86$	$AB = -0,4$



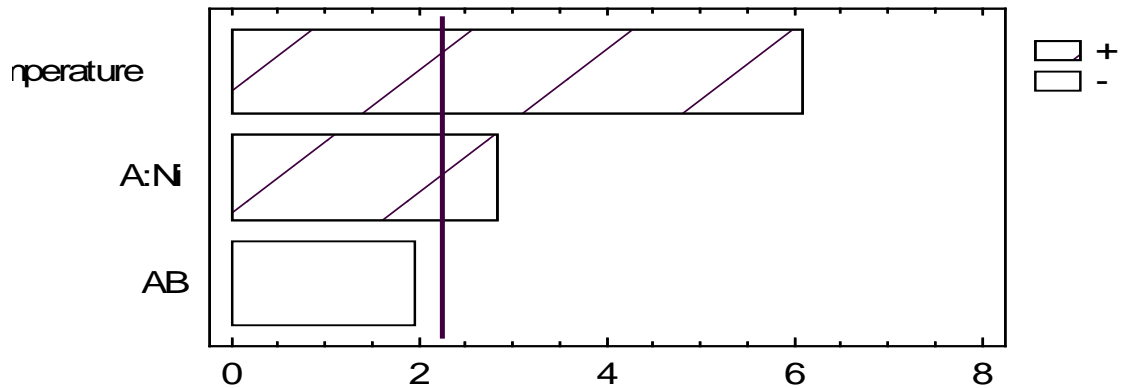
**Рис. 1. Тенденції впливу чинників на вміст GSH у коренях проростків кукурудзи.**

Тут і на рис. 2-4: А – ефект іонів нікелю; В – ефект температури; АВ – ефект взаємодії факторів. За віссю абсцис розташовані значення стандартизованого ефекту факторів (умовні одиниці); вертикальна риска вказує 95%-й рівень достовірності.

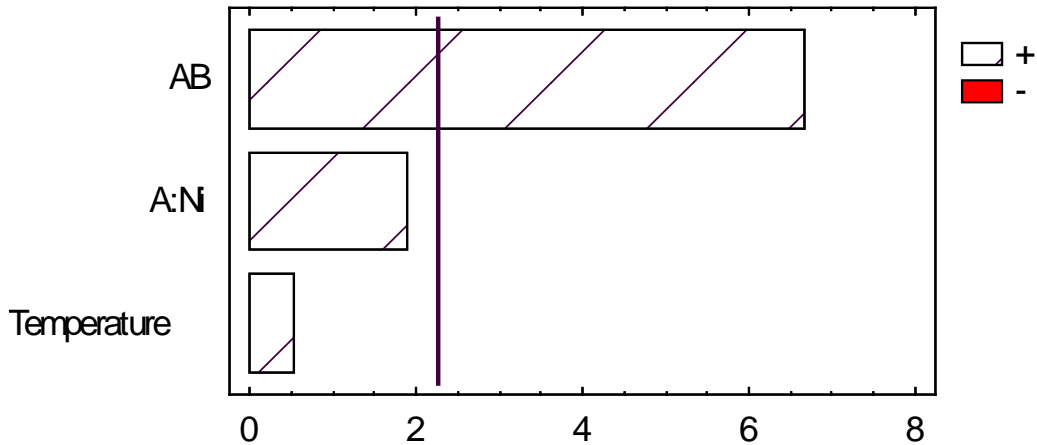
### ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ

**Таблиця 3. Динаміка вмісту GSH (1) та активності GST (2) у коренях гороху за сумісного впливу Ni<sup>2+</sup> (A) та гіпертермії (B)**

№	R <sup>2</sup> , %	Математична модель (рівняння регресії)	Ефекти впливу Ni <sup>2+</sup>	Ефекти впливу гіпертермії	Ефект взаємодії факторів
1	84,4	$y = 15,52 + 0,62a + 0,14b + 2,29ab$	A <sup>-</sup> = -3,35 A <sup>+</sup> = 5,82	B <sup>-</sup> = -4,31 B <sup>+</sup> = 4,87	AB = 4,59
2	92,6	$y = 4,45 + 0,08a - 0,34b + 0,05ab$	A <sup>-</sup> = 0,05 A <sup>+</sup> = 0,26	B <sup>-</sup> = -0,78 B <sup>+</sup> = -0,57	AB = 0,11



**Рис. 2. Тенденції впливу чинників на активність GST у коренях проростків кукурудзи.**

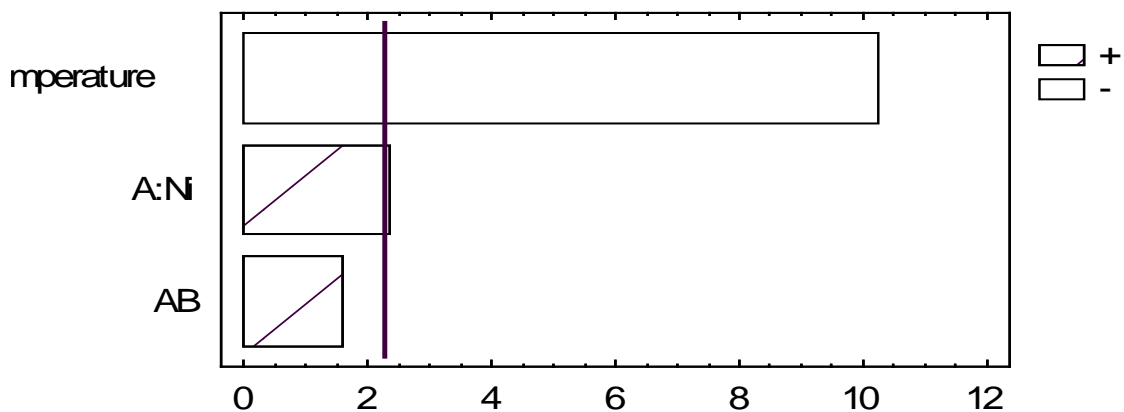


**Рис. 3. Тенденції впливу чинників на вміст GSH у коренях проростків гороху.**

Таким чином, у коренях проростків кукурудзи ефект впливу кожного з чинників знижувався за максимального значення другого чинника, а ефект їх взаємодії був спрямований на зниження вмісту GSH та активності GST. Динаміка змін обох показників у коренях кукурудзи більшою мірою визначалася ефектом впливу гіпертермії, ніж іонів нікелю. Навпаки, у коренях гороху ефект кожного з чинників на вміст GSH та активність GST за максимального

значення другого чинника зростав, а ефект їх взаємодії сприяв збільшенню показників. При цьому у коренях гороху динаміка вмісту GSH більшою мірою визначалася ефектом впливу Ni<sup>2+</sup>, тоді як рівень активності GST – ефектом впливу гіпертермії. Згідно з результатами факторного аналізу (Максимов, 1980), наявність ефектів взаємодії свідчить про тісний взаємний зв'язок впливу чинників на динаміку вмісту GSH та активності GST у коренях рослин, при-

## ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ



**Рис. 4.** Тенденції впливу чинників на активність GST у коренях проростків гороху.

чому отримані результати вказують на видову специфічність взаємодії у коренях проростків кукурудзи та гороху.

Установлені закономірності доцільно зіставити з даними літератури щодо функціонування циклу глутатіону у рослинних клітинах за дії важких металів та гіпертермії. Відомо, що пул відновленого глутатіону визначається активністю процесів його біосинтезу, відновлення з окисненої форми та утилізації (Noctor et al., 1998), зокрема, у реакціях за участю GST (Marrrs, 1996). Показано, що глутатіон-редуктаза, яка відновлює окиснений глутатіон, активується пізніше індукції синтезу GSH за дії важких металів (Cuypers et al., 2001) і гіпертермії (Ma et al., 2008), тому можна припустити, що виявлене нами за 30-хвилинного впливу зростання вмісту GSH свідчить саме про посилення його біосинтезу у коренях кукурудзи та гороху. Відомо також, що нікель не належить до індукторів синтезу фітохелатинів (Tukendorf et al., 1990; Schat et al., 2002). Крім того, цей процес потребує певного лаг-періоду (Li et al., 2009), тож у нашому експерименті зменшення вмісту GSH, імовірно, не було пов'язано з його витратами на синтез фітохелатинів.

У коренях кукурудзи зростання вмісту  $Ni^{2+}$  у середовищі на фоні мінімальної температури супроводжувалося як накопиченням пулу відновленого глутатіону, так і зростанням активності GST, яке передбачає посилення його витрат. Одночасний перебіг зазначених процесів вказував на те, що у коренях кукурудзи спільна дія чинників індуквала процеси біосинтезу GSH та детоксикації  $Ni^{2+}$ . На користь швидкої реакції циклу глутатіону свідчать дані про зміни вмісту GSH у коренях кукурудзи вже після 15 хвилин дії сполук кадмію, цинку, міді

(Tukendorf et al., 1990). У коренях гороху при збільшенні концентрації  $Ni^{2+}$  у середовищі за мінімальної температури зміни вмісту GSH та активності GST вказували на відсутність активації синтезу GSH та незначне посилення процесу знешкодження  $Ni^{2+}$ . Видова специфічність ефекту іонів нікелю могла зумовлюватися також їх повільнішим надходженням за мінімальної температури у корені гороху. Зроблене припущення потребує підтвердження, але узгоджується з даними про те, що у клітинних оболонках дводольних рослин більше місць для зв'язування двовалентних катіонів, а отже і нижча швидкість їх проникнення у клітини (Серегин и др., 2008; Vazquez et al., 2009).

Ефект гіпертермії виявився найбільш впливовим на динаміку активності GST у коренях кукурудзи та гороху, що можна вважати проявом активації антиоксидантної ферментної системи рослин, котру, як відомо, спричинює високотемпературний стрес (Almeselmani et al., 2006; Haluskova et al., 2009; Колупаев, Карпец, 2010). Видові особливості реакції GST відбилися у різноспрямованості впливу гіпертермії у коренях кукурудзи та гороху.

Ефект взаємодії чинників також був видоспецифічним: у коренях кукурудзи процеси накопичення GSH та активації GST були уповільнені за максимальних значень чинників, тоді як у коренях гороху саме за таких умов відзначено зростання пулу відновленого глутатіону та менш значне зниження ферментативної активності.

Таким чином, протягом перших 30 хв сумісної дії  $Ni^{2+}$  і гіпертермії у коренях кукурудзи та гороху виявлено динамічні зміни пулу GSH та активності GST, які вказують на залучення циклу глутатіону у реакції-відповіді рослинних

## ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ

клітин на два стресори та взаємодію вказаних чинників. У коренях кукурудзи ефект взаємодії був спрямований на зниження показників, рівень яких більшою мірою визначався впливом гіпертермії, ніж іонів нікелю. У коренях гороху ефект взаємодії чинників сприяв зростанню показників, при цьому вміст GSH визначався переважно ефектом впливу іонів нікелю, а рівень активності GST – ефектом впливу гіпертермії. Різноспрямованість ефекту взаємодії  $Ni^{2+}$  і гіпертермії вказує на видову специфічність регуляції метаболічного циклу глутатіону у коренях кукурудзи та гороху за сумісного впливу абіотичних чинників.

## ЛІТЕРАТУРА

- Адлер Ю.П. Планирование экспериментов – путь лабораторных исследований (Ч. 2) // Современ. лаб. практика. – 2009. – № 3. – С. 16-21.
- Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В. Формирование адаптивных реакций растений на действие абiotических стрессоров. – Киев: Основа, 2010. – 352 с.
- Максимов В.Н. Многофакторный эксперимент в биологии. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 280 с.
- Серегин И.В., Кожевникова А.Д., Казюмина Е.М., Иванов В.Б. Токсическое действие и распределение никеля в корнях кукурузы // Физиология растений. – 2003. – Т. 50, № 5. – С. 793-800.
- Серегин И.В., Кожевникова А.Д. Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция // Физиология растений. – 2008. – Т. 55, № 1. – С. 3-26.
- Сищиков Д.В., Гришко В.М. Глутатионзалежна антиоксидантна система проростків гороху та кукурудзи за дії сполук нікелю // Укр. біохім. журн. – 2003. – Т. 75, № 4. – С. 131-138.
- Хромих Н.О., Россихіна Г.С., Лашко В.В. Вплив гербіцидів нового покоління на фізіолого-біохімічні показники насіння кукурудзи // Вісн. Харків. нац. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія. – 2011. – Вип. 3 (24). – С. 50-55.
- Almeselmani M., Deshmukh P.S., Sairam R.K., Kushwaha S.R., Singh T.P. Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress // Plant Science. – 2006. – V. 171, № 3. – P. 382-388.
- Babar A.M., Hahn E.-J., Pack K.-Y. Effects of temperature on oxidative stress defense system, lipid peroxidation, and lipoxygenase activity in *Phalaenopsis* // Plant Physiol. Biochem. – 2005. – V. 43, № 3. – P. 213-223.
- Bhatia N.P., Walsh K.B., Baker A.J. Detection and quantification of ligands involved in nickel detoxification in a herbaceous Ni hyperaccumulator *Stackhousia tryonii* Bailey // J. Exp. Bot. – 2005. – V. 56, № 15. – P. 1343-1349.
- Chaney R.L., Reeves P.G., Ryan J.A., Simmons R.W., Welch R.M., Angle J.S. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost method to phytoextract Cd from contaminated soil to prevent soil Cd risk // Biometals. – 2004. – V. 17, № 5. – P. 549-553.
- Cuypers A., Vangronsveld J., Clijsters H. The redox status of plant cells (AsA and GSH) is sensitive to zinc imposed oxidative stress in roots and primary leaves of *Phaseolus vulgaris* // Plant Physiol. Biochem. – 2001. – V. 39, № 7-8. – P. 657-664.
- Freeman J.L., Persans M.W., Nieman K., Albrecht C., Peer W., Pickering I.J., Salya D.E. Increased Glutathione Biosynthesis Plays a Role in Nickel Tolerance in *Thlaspi* Nickel Hyperaccumulators // Plant Cell. – 2004. – V. 16, № 8. – P. 2176-2191.
- Haluskova L., Valentovicova K., Huttova J., Mistrik I., Tamas L. Effect of abiotic stresses on glutathione peroxidase and glutathione S-transferase activity in barley root tips // Plant Phys. Biochem. – 2009. – V. 47, № 11-12. – P. 1069-1074.
- Ingle R.A., Mugford S.T., Rees J.D., Campbell M.M., Smith A.C. Constitutively High expression of the Histidine Biosynthetic Pathway Contributes to Nickel Tolerance in Hyperaccumulator Plants // Plant Cell. – 2005. – V. 17, № 7. – P. 2089-2106.
- Li A.-M., Yu B.-Y., Chen F.-H., Gan H.-Y., Yuan J.-C., Qiu R., Huang J.-C., Yang Z.-Y., Xu Z.-F. Characterization of the *Sesbania rostrata* Phytochelatin Synthase Gene: Alternative Splicing and Function of Four Isoforms // Int. J. Mol. Sci. – 2009. – V. 10. – P. 3269-3282.
- Llamas A., Ullrich C.I., Sanz A.  $Ni^{2+}$  toxicity in rice: Effect on membrane functionality and plant water content // Plant Physiol. Biochem. – 2008. – V. 46, № 10. – P. 905-910.
- Ma Y.-H., Ma F.-W., Zhang J.-K., Li M.-J., Wang Y.-H., Liang D. Effects of high temperature on activities and gene expression of enzymes involved in ascorbate-glutathione cycle in apple leaves // Plant Sci. – 2008. – V. 175, № 6. – P. 761-766.
- Mari S., Gendre D., Pianelli K., Querdan L., Lobinski R., Briat J.-F., Lebrun M., Czernic P. Root-to-shoot long-distance circulation of nicotianamine and nicotianamine-nickel chelates in the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* // J. Exp. Bot. – 2006. – V. 57, № 15. – P. 4111-4122.
- Marrs K.A. The functions and regulation of glutathione-S-transferases in plants // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. – 1996. – № 47. – P. 127-158.

## ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ

- Noctor G., Arisi A. C. M., Jounanin L. Glutathione: biosynthesis, metabolism and relationship to stress-tolerance explored in transformed plants // J. Exp. Bot. – 1998. – V. 49, № 321. – P. 623-647.
- Schat H., Llugany M., Vooijs R., Hartley J., Whitaker J.H., Bleeker P.M. The role of phytochelatins in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes // J. Exp. Bot. – 2002. – V. 53, № 379. – P. 2381-2392.
- Tukendorf A., Rauser W.E. Changes in glutathione and phytochelatins in roots of maize seedlings exposed to cadmium // Plant Sci. – 1990. – V. 70, № 2. – P. 155-166.
- Vazquez S., Goldsbrough P., Carpena R.O. Comparative analysis of the contribution of phytochelatins to cadmium and arsenic tolerance in soybean and white lupin // Plant Physiol. Biochem. – 2009. – V. 47, № 1. – P. 63-67.

Надійшла до редакції  
23.07.2012 р.

## FACTORIAL ANALYSIS OF Ni<sup>2+</sup> AND HEAT ACTION ON REDUCED GLUTATHIONE CONTENT AND GLUTATHIONE-S-TRANSFERASE ACTIVITY IN MAIZE AND PEA ROOTS

N. O. Khromykh<sup>1</sup>, E. S. Boroday<sup>2</sup>, Yu. V. Lykholat<sup>2</sup>

Oles Gonchar Dnipropetrovsk National University  
<sup>1</sup>Biology Research Institute  
<sup>2</sup>Department of Plant Physiology and Introduction  
(Dnipropetrovsk, Ukraine)

In planned factorial experiment the changes of reduced glutathione (GSH) content and glutathione S-transferase activity in the roots of 5-days maize (*Zea mays* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) seedlings after 30-minute combined action of nickel nitrate in the concentration range of 0,1-1,0 mM and the temperature in the range of 32-45°C were studied. The effect of Ni<sup>2+</sup> and heat interaction to measured indices was revealed, and it shows the close connection between factors during their combined action to the plant metabolic processes. The specific features of each factor effect and effect of their interaction in roots of maize and pea seedlings were shown.

**Key words:** *Zea mays*, *Pisum sativum*, roots, nickel ions, heat, reduced glutathione, glutathione S-transferase, factorial experiment

## ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ Ni<sup>2+</sup> И ГИПЕРТЕРМИИ НА СОДЕРЖАНИЕ ВОССТАНОВЛЕННОГО ГЛУТАТИОНА И АКТИВНОСТЬ ГЛУТАТИОН-S-ТРАНСФЕРАЗЫ В КОРНЯХ КУКУРУЗЫ И ГОРОХА

Н. А. Хромых<sup>1</sup>, Е. С. Бородай<sup>2</sup>, Ю. В. Лихолат<sup>2</sup>

Днепропетровский национальный университет им. Олесь Гончара  
<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт биологии  
<sup>2</sup>Кафедра физиологии и интродукции растений  
(Днепропетровск, Украина)

В планированном факторном эксперименте изучено изменение содержания восстановленного глутатиона (GSH) и активности глутатион-S-трансферазы (GST) в корнях 5-суточных проростков кукурузы (*Zea mays* L.) и гороха (*Pisum sativum* L.) при 30-минутном совместном воздействии нитрата никеля в диапазоне концентраций 0,1-1,0 mM и температуры в диапазоне 32-45°C. Выявлен эффект взаимодействия Ni<sup>2+</sup> и гипертермии на измеряемые показатели. Показаны видовая специфичность действия каждого из факторов и их взаимодействия в корнях проростков кукурузы и гороха.

**Ключевые слова:** *Zea mays*, *Pisum sativum*, корни, ионы никеля, гипертермия, восстановленный глутатион, глутатион-S-трансфераза, факторный эксперимент