

Beata SMOLIK

REAKCJA WYBRANYCH ODMIAN ŻYTA OZIMEGO NA STRES WYWOŁANY RÓŻNYMI CZYNNIKAMI ABIOTYCZNYMI

REACTION OF SELECTED WINTER RYE VARIETIES TO STRESS INDUCED BY DIFFERENT ABIOTIC FACTORS

Zakład Biochemii, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ul. Juliusza Słowackiego 17, 71–434 Szczecin, e-mail: beata.smolik@zut.edu.pl

Abstract. The pot experiment was conducted in laboratory conditions. The soil used in experiment was loamy sand with 1.2% of organic carbon. To individual soil samples the following solutions were added 2.5 mM $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (207 mg Pb^{+2}), 30 mM NaF (570.0 F^-), 0.05 mM H_2SeO_3 (3,95 Se^{4+}), aqueous emulsion of Izoturon 500 SC herbicide in an amount of $6.5 \text{ mm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ soil. The aim of this study was to determine the influence of chosen pollutants on biometric parameters and SOD activity in three winter rye cultivars. Substances applied to the soil significantly reduced growth, fresh weight and superoxide dismutase activity in three winter rye cultivars planted in contaminated soil in comparison with control plants. Rye cultivars were characterized by different tolerance to chosen substances. It was found that cultivar 'Chobre' was more sensitive to introduced pollutants than 'Skat' and 'Dańkowskie Diamant'.

Słowa kluczowe: dysmutaza ponadtlenkowa, reakcja, reaktywne formy tlenu, stres abiotyczny, żyto.
Key words: abiotic stress, reactive oxygen species, response, rye, superoxide dismutase.

WSTĘP

Rośliny w środowisku przyrodniczym są narażone na oddziaływanie różnych czynników stresowych, wśród których szczególnie niebezpieczne są te związane z działalnością człowieka, np. pestycydy, metale ciężkie i inne zanieczyszczenia przemysłowe (m.in. związki fluoru, selenu). Nadmierna akumulacja tych związków w środowisku glebowym wpływa na zakłócenie procesów fizjologicznych i biochemicznych u roślin. Szacuje się, że dwie trzecie plonów roślin uprawnych zostaje utraconych ze względu na działanie niekorzystnych czynników środowiska. Z drugiej strony przypuszcza się, że 10 mld ludzi w 2050 roku będzie miało poważny problem związany z brakiem żywności (Gill i Tuteja 2010). Dlatego też powinno się poszukiwać roślin o zwiększonej żywotności i wysokiej tolerancji na niekorzystne czynniki środowiska.

Reakcja roślin na różne czynniki stresowe jest przedmiotem wielu badań. Czynniki stresowe (abiotyczne i biotyczne) prowadzą do powstawania reaktywnych form tlenu (RFT), które są bardzo niebezpieczne dla komórki (Mittler 2002, Candan i Tarhan 2003, Vaidyanathan i in. 2003, Małecka i Tomaszewska 2005).

Toksyczne działanie RFT polega na ich reaktywności ze składnikami żywej komórki takimi jak: lipidy, białka, enzymy, kwasy nukleinowe i cukry. Prowadzi to do wielu modyfikacji struktury i funkcji tych cząsteczek (Bartosz 2003, Apel i Hirt 2004, Ashraf i Harris 2005, Molassiotis i in. 2006).

Akumulacja RFT w roślinach pod wpływem środowiskowych stresów jest główną przyczyną zmniejszenia wydajności upraw na świecie (Mittler 2002, Apel i Hirt 2004).

W celu złagodzenia uszkodzeń wywołanych przez RFT rośliny wykształciły liczne mechanizmy ochronne zwane ogólnie – systemem obrony antyoksydacyjnej. System ten składa się z wielu, pod względem chemicznym i sposobem działania, przeciwutleniaczy, które są skuteczne na różnych poziomach stresu podczas życia roślin (Łata 1998, Mittler 2002, Beak i Skinner 2003). Jednym z przeciwutleniaczy enzymatycznych jest dysmutaza ponadtlenkowa (SOD). Dysmutazy zalicza się do głównych enzymów uczestniczących w pierwszej kolejności w regulacji stężenia RFT (Bartosz 2003). Izoformy SOD mogą występować w różnych częściach komórki: w matriks mitochondrium, peroksysomach i glioksysomach. Możemy wyróżnić trzy grupy dysmutaz, różniące się między sobą kofaktorami i wrażliwością na inhibitory oraz wykazujące zróżnicowanie przestrzenne. W zależności od metalu obecnego w centrum aktywnym wyróżniamy dysmutazy: miedziowo-cynkową (CuZn-SOD), manganową (Mn-SOD) oraz żelazową (Fe-SOD). Enzym ten katalizuje reakcję dysmutacji anionorodnika ponadtlenkowego ($O_2 \cdot^-$), która prowadzi do powstania nadtlenu wodoru i tlenu cząsteczkowego (Mittler 2002, Małecka i Tomaszewska 2005). Działanie samej dysmutazy ponadtlenkowej powoduje przekształcanie rodnika tlenowego w inną formę RFT, który dalej jest rozkładany przez katalazę i wiele peroksydaz (Rucińska i in. 1999).

Uprawa odmian tolerujących czynniki środowiskowe to najprostszy i najtańszy sposób na przeciwdziałanie stratom spowodowanym przez stresy (Ashraf i Harris 2005). Abiotyczne czynniki stresowe są główną przyczyną zmniejszonych plonów i wydajności najważniejszych gatunków roślin, takich jak zboża.

Żyto (*Secale cereale*), w porównaniu z innymi gatunkami zbóż, charakteryzuje się znacznie większym zakresem tolerancji na różnego rodzaju stresy środowiskowe w przypadku zmiennych warunków glebowych i może być uprawiane na wszystkich typach gleb. Jest genetycznie predysponowane do wzrostu i rozwoju w niesprzyjających warunkach środowiskowych. Ma bardzo silnie rozwinięty system korzeniowy, w związku z czym jest rośliną o małych wymaganiach glebowych (Kubicka 2004).

Chociaż w tworzeniu nowych odmian żyta zwraca się uwagę na uzyskanie, oprócz dużego plonu dobrej jakości, odmian odpornych na porastanie, wyleganie, choroby, jak również tolerujących różnego rodzaju stresy biotyczne i abiotyczne, to nie zawsze nowe odmiany są lepiej przystosowane do niesprzyjających warunków środowiska. Może bowiem się zdarzyć, że w toku prowadzonych prac hodowlanych z genomu żyta zostaną wyparte niektóre geny, decydujące o odporności na określony czynnik stresowy. Wówczas powstaną genotypy, które

mogą okazać się wrażliwe na różne czynniki: zmiany warunków wegetacji, pojawienie się nowych chorób, szkodników itp. (Dubert 1995). Dobrym rozwiązaniem w takiej sytuacji jest powrót do korzeni, tzn. „sięgniecie” po dzikie (prymitywne) formy tych roślin.

Celem pracy było określenie wpływu różnych polutantów (ołowiu, fluoru, selenu i herbicydu Izoturon 500 SC) na wzrost i rozwój roślin, a także na aktywność enzymu antyoksydacyjnego – dysmutazy ponadtlenkowej u różnych odmian żyta.

MATERIAŁ I METODY

Doświadczenie wazonowe założono w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzono je na glinie lekkiej (PTG 2008), o zawartości próchnicy 1,2%. Glebę pobierano z pola i w laboratorium przesiewano przez sito o średnicy oczek 2 mm. Do poszczególnych próbek glebowych wprowadzono następujące roztwory polutantów: 2,5 mM $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (517,5 mg Pb^{+2}), 30 mM NaF (570,0 F^-), 0,05 mM H_2SeO_3 (3,95 Se^{4+}) oraz wodną emulsję herbicydu Izoturon 500 SC wprowadzonego w ilości $6,5 \text{ mm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby (substancja aktywna: Izoproturon – $500 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, ilość wprowadzonej substancji aktywnej: $3,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Dawki zastosowanych polutantów były odpowiednio 5-krotnie wyższe od ilości dopuszczalnych w glebie, a ilość użytego herbicydu była 5-krotnością dawki zalecanej przez producenta.

Po naniesieniu wodnych roztworów ww. substancji wilgotność gleby doprowadzono do 60% maksymalnej pojemności wodnej i dokładnie wymieszano. Wazony napełniono 1-kilogramowymi próbkami gleby i do każdego z nich wysiano po 25 nasion trzech odmian żyta: ‘Chobre’, ‘Skat’ (otrzymano ze spółki „Danko” Hodowla Roślin w Choryni) i ‘Dańkowskie Diament’ (otrzymano z Krajowego Centrum Roślinnych Zasobów Genowych Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Radzikowie).

Tak przygotowane wazony umieszczono pod lampą sodową SON-T Agro, której spektrum światła było zbliżone do światła słonecznego. Natężenie promieniowania wynosiło około $90 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Fotoperiodyzm ustalono na 12 godzin dnia i nocy. Przez cały okres trwania doświadczenia wilgotność podłoża utrzymywano na poziomie około 60–65% m.p.w.

W trzech fazach rozwojowych żyta w fazie drugiego i trzeciego liścia oraz krzewienia – pobierano próbki roślinne (wyłącznie zielone części nadziemne roślin) z poszczególnych kombinacji i w wymienionych terminach analiz oznaczano całkowitą aktywność dysmutazy ponadtlenkowej. Pomiar SOD przeprowadzono kolorymetrycznie za pomocą spektrofotometru Nova 400, firmy Merck, przy długości fali $\lambda = 560 \text{ nm}$, metodą Abassi i in. (1998). Metoda pomiaru SOD polegała na oznaczeniu stopnia redukcji błękitu nitrotetrazoliowego (NBT) przez anionorodnik ponadtlenkowy ($\text{O}_2 \cdot^-$) powstający w wyniku fotochemicznej redukcji ryboflawiny. Za Beauchampem i Fridovichem (1971) obliczono aktywność enzymu i wyrażono ją w jednostkach aktywności ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ ś.m. rośliny). Za jedną jednostkę aktywności SOD przyjęto taką objętość enzymu, która spowodowała 50-procentowe zahamowanie fotochemicznej redukcji NBT.

Podczas doświadczenia prowadzono również pomiary biometryczne roślin, określając średnią wysokość (mm) oraz średnią masę roślin (g).

W celu sprawdzenia zmian odczynu gleby pod wpływem dodanych polutantów po tygodniu od założenia doświadczenia zmierzono potencjometrycznie pH gleby w H₂O i 1M KCl, stosując wagowy stosunek gleby do roztworu 1 : 2,5 dla gleb gliniastych (Lityński i in. 1976).

Otrzymane wyniki opracowano statystycznie. Obliczono istotność różnic pomiędzy roślinami kontrolnymi i rosnącymi w glebie z polutantem za pomocą testu t-Studenta, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

WYNIKI I DISKUSJA

Spośród zastosowanych w doświadczeniu związków, jedynie fluor spowodował zmianę pH gleby (tab. 1). Odczyn gleby pod wpływem tego czynnika mieścił się jednak w granicach obojętnego. Pozostałe polutanty w niewielkim stopniu wpływały na zmianę pH gleby.

Tabela 1. Wpływ poszczególnych polutantów na pH gleby
Table 1. Influence of individual pollutants on soil pH

Polutants Pollutants	pH gleby pH soil	
	H ₂ O	KCl
Kontrola – Control	7,19	6,90
Pb(NO ₃) ₂	7,25	6,95
NaF	7,46	7,07
H ₂ SeO ₃	7,23	6,92
Izoturon 500 SC	7,27	6,98

Stwierdzono, że zastosowane w doświadczeniu substancje spowodowały obniżenie wzrostu i spadek świeżej masy roślin u wszystkich odmian żyta (tab. 2–3). Wykazano różnice w wartościach tych parametrów między odmianami. Izoproturon wywarł najbardziej hamujący wpływ na wzrost i masę roślin odmian: 'Chrobre' i 'Skat'. Chociaż odmiany te w warunkach zastosowanego herbicydu wykazywały zbliżoną wysokość i masę roślin, to porównując je z roślinami kontrolnymi stwierdzono, że niekorzystne działanie izoproturonu na te parametry było wyraźniejsze u odmiany 'Chrobre'. Z kolei fluor okazał się czynnikiem, który w największym stopniu ograniczył wzrost roślin i obniżył świeżą ich masę u odmiany 'Dańkowskie Diament'.

W doświadczeniu Jianga i in. (2010) zaobserwowano brak istotnych zmian w świeżej masie sadzonek *Luffa cylindrica* oraz widocznych objawów toksyczności ołowiu w roślinach rosnących w pożywce zawierającej 100 μM tego metalu. Jednak znaczący spadek tempa wzrostu cytowali autorzy obserwowali przy większych stężeniach ołowiu. Świeża masa liścieni, hypokotyli i korzeni obniżyła się odpowiednio o 44,8% (200 μM Pb), 26,5% (400 μM) i 31,7% (800 μM Pb). W badaniach Xue i in. (2001) obserwowano zahamowanie wzrostu oraz świeżej masy roślin pod wpływem selenu wprowadzonego do gleby w stężeniach 0,1–1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabela 2. Średnia wysokość roślin (cm)
Table 2. The mean height of plants (cm)

Faza rozwojowa roślin The developmental stages of plants	Kontrola Control	Pb	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola Control	F	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola Control	Se	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola Control	Izoproturon	NIR _{0,05} LSD _{0,05}
'Chrobre'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	29,4 ± 4,15	18,0 ± 4,22	4,19*	29,4 ± 2,57	23,6 ± 3,44	2,07*	29,4 ± 2,30	21,6 ± 2,56	2,44*	29,4 ± 3,78	15,0 ± 0,23	4,27*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	31,6 ± 5,22	28,3 ± 3,72	3,09*	31,2 ± 3,35	27,8 ± 4,24	1,98*	31,2 ± 2,58	27,2 ± 2,35	2,65*	31,2 ± 3,26	22,0 ± 2,49	4,21*
Krzewienie Fostering	36,4 ± 4,21	25,4 ± 2,66	2,21*	36,4 ± 3,46	31,7 ± 3,47	3,23*	36,4 ± 3,27	31,4 ± 3,58	3,12*	36,4 ± 3,04	25,1 ± 2,38	4,53*
'Skat'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	20,0 ± 3,31	18,6 ± 3,65	r n.	20,0 ± 3,26	19,3 ± 2,18	r n.	20,0 ± 3,08	17,2 ± 2,55	r n.	20,0 ± 2,56	14,7 ± 2,17	3,56*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	28,1 ± 3,57	24,7 ± 3,24	2,30*	28,1 ± 3,43	29,3 ± 4,06	r n.	28,1 ± 2,56	26,3 ± 3,06	1,44*	28,1 ± 3,56	20,8 ± 2,37	2,75*
Krzewienie Fostering	31,6 ± 4,01	26,6 ± 2,27	2,51*	31,6 ± 2,19	29,0 ± 3,67	r n.	31,6 ± 3,06	27,4 ± 2,96	2,32*	31,6 ± 2,36	24,5 ± 3,66	3,64*
'Dańkowskie Diament'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	24,5 ± 3,26	21,4 ± 3,52	1,59*	24,5 ± 3,54	18,3 ± 3,17	2,69*	24,5 ± 2,58	21,0 ± 3,45	2,14*	24,5 ± 2,67	21,9 ± 3,21	2,51*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	28,0 ± 4,02	24,9 ± 4,31	1,52*	28,0 ± 4,01	22,1 ± 1,38	2,16*	28,0 ± 2,53	24,6 ± 3,58	2,86*	28,0 ± 3,56	24,7 ± 4,17	3,54*
Krzewienie Fostering	29,6 ± 4,16	25,6 ± 3,14	1,73*	29,6 ± 3,25	23,2 ± 1,97	1,33*	29,6 ± 2,44	26,0 ± 2,20	2,07*	29,6 ± 2,67	26,3 ± 3,28	2,32*

NIR – najmniejsza istotna różnica, przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$; * istotność różnic przy poziomie $\alpha < 0,05$; rn. – różnica nieistotna; \pm – odchylenie standardowe. LSD – least significant difference, with significance level $\alpha < 0.05$; * significance of differences at the level of $\alpha < 0.05$; rn. – nonsignificant difference; \pm – standard deviation.

Tabela 3. Średnia masa roślin (g)
Table 3. The mean weight of plants (g)

Faza rozwojowa roślin The developmental stages of plants	Kontrola	Pb	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola	F	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola	Se	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola	Izoproturon	NIR _{0,05} LSD _{0,05} 5
'Chobre'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	0,21 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,025*	0,21 ± 0,02	0,17 ± 0,03	0,037*	0,21 ± 0,02	0,14 ± 0,06	0,042*	0,21 ± 0,08	0,08 ± 0,03	0,057*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	0,24 ± 0,03	0,23 ± 0,03	0,030*	0,24 ± 0,02	0,22 ± 0,02	0,027*	0,24 ± 0,04	0,22 ± 0,03	r n.	0,24 ± 0,02	0,21 ± 0,03	0,026*
Krzewienie Tillering	0,26 ± 0,04	0,24 ± 0,05	0,034*	0,26 ± 0,02	0,26 ± 0,03	r n.	0,26 ± 0,02	0,25 ± 0,04	r n.	0,26 ± 0,06	0,24 ± 0,05	r n.
'Skat'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	0,14 ± 0,05	0,11 ± 0,02	0,045*	0,15 ± 0,03	0,12 ± 0,02	0,027*	0,14 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,025*	0,14 ± 0,01	0,08 ± 0,02	0,021*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	0,23 ± 0,02	0,21 ± 0,05	0,035*	0,23 ± 0,02	0,23 ± 0,03	r n.	0,23 ± 0,02	0,22 ± 0,03	r n.	0,23 ± 0,02	0,19 ± 0,03	0,022*
Krzewienie Tillering	0,25 ± 0,03	0,23 ± 0,02	0,032*	0,25 ± 0,05	0,25 ± 0,02	r n.	0,25 ± 0,02	0,25 ± 0,03	r n.	0,25 ± 0,02	0,24 ± 0,03	r n.
'Dańkowskie Diament'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	0,21 ± 0,03	0,16 ± 0,03	0,034*	0,21 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,036*	0,21 ± 0,03	0,16 ± 0,02	0,036*	0,21 ± 0,03	0,18 ± 0,04	0,031*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	0,23 ± 0,04	0,23 ± 0,04	0,039*	0,23 ± 0,04	0,21 ± 0,02	r n.	0,23 ± 0,04	0,21 ± 0,03	r n.	0,23 ± 0,04	0,19 ± 0,03	0,037*
Krzewienie Tillering	0,26 ± 0,03	0,23 ± 0,03	0,028*	0,26 ± 0,03	0,22 ± 0,03	0,033	0,26 ± 0,03	0,24 ± 0,03	r n.	0,26 ± 0,03	0,24 ± 0,03	0,027*

NIR – najmniejsza istotna różnica, przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$; * istotność różnic przy poziomie $\alpha < 0,05$; r n. – różnica nieistotna; \pm – odchylenie standardowe.
LSD – least significant difference, with significance level $\alpha < 0,05$; * significance of differences at the level of $\alpha < 0,05$; r n. – nonsignificant difference; \pm – standard deviation.

Wprowadzenie do gleby ołowiu, fluoru oraz herbicydu wpłynęło na wzrost aktywności SOD (w porównaniu z aktywnością enzymu w roślinach kontrolnych) u wszystkich odmian żyta. Jedynie w przypadku roślin rosnących w glebie z dodatkiem selenu stwierdzono zbliżoną aktywność enzymu jak w roślinach kontrolnych (tab. 4).

Największe zmiany – wzrost aktywności SOD w porównaniu z roślinami kontrolnymi – stwierdzono u roślin rosnących w glebie z dodatkiem izoproturonu. Stymulacja aktywności badanego enzymu zmniejszała się w miarę wzrostu roślin. Wzrost aktywności SOD pod wpływem jonów ołowiu zaobserwowano także w badaniach Deya i in. (2007) w siewkach pszenicy w stężeniach od 0,1 do 2000 μM soli Pb, w korzeniach i pędach ryżu w doświadczeniu Vermy i Dubeya (2003) przy stężeniu 500 i 1000 μM soli Pb oraz w badaniach Małeckiej i in. (2001) w korzeniach grochu pod wpływem 1000 μM ołowiu. Odmienną reakcją, ale pod wpływem zdecydowanie niższego stężenia soli Pb (0,01–0,5 mM soli Pb), oznaczono w doświadczeniu Paczkowskiej i in. (2007), gdzie u *Lemna minor* nie odnotowano zmian w aktywności SOD. Nastomiast w doświadczeniu Wilde i Yu (1998) w obecności 0,1, 0,2, 1 i 5 mM NaF obserwowano podczas kiełkowania fasoli złotej obniżenie aktywności SOD. Chlubek i in. (2001) podają, że fluor jest jednym z pierwiastków odgrywających stymulującą rolę w procesach wolnorodnikowych. Według Kabaty-Pendias i Pendias (1999) zwiększony poziom selenu może powodować spadek aktywności dysmutazy ponadtlenkowej. W badaniach Nowak i in. (2004) wykazano, że selen zastosowany w dawce 0,05 mM \cdot kg⁻¹ gleby zwiększał zdolność systemów antyoksydacyjnych w pszenicy i rzepaku, zaś w dawce 0,45 mmol \cdot kg⁻¹ gleby hamował rozwój badanych roślin, zmniejszając aktywność katalazy, peroksydazy i oksydazy polifenolowej. Gill i Tuteja (2010) podają, że obserwowany wzrost aktywności SOD w wielu badaniach wskazuje, że różnego rodzaju stresy powodują zwiększenie produkcji rodnika ponadtlenkowego. Aktywacja SOD w wyniku stresu oksydacyjnego, wywołanego czynnikami biotycznymi i abiotycznymi, odgrywa kluczową rolę w przetrwaniu roślin w warunkach stresów środowiskowych. Enzymatyczny system obrony antyoksydacyjnej jest niezwykle ważny w komórkach roślinnych, gdyż to on warunkuje stopień tolerancji organizmu na stres związany z ekspozycją na zanieczyszczenia (Gill i Tuteja 2010).

Porównując odmiany żyta (tab. 4) testowane w doświadczeniu zaobserwowano, że odmiana 'Chobre' wykazała większy wzrost aktywności SOD pod wpływem wprowadzonych do gleby polutantów w porównaniu z odmianami 'Skat' i 'Dańkowskie Diament', co może świadczyć o różnej tolerancji badanych odmian na oceniane czynniki.

Tabela 4. Aktywność SOD ($U \cdot g^{-1}$ ś.m.) w liściach trzech odmian żyta rosnących w glebie kontrolnej oraz w glebie z dodatkiem różnych polutantów
 Table 4. SOD activity ($U \cdot g^{-1}$ ś.m.) in leaves of three winter rye cultivars grown in control and polluted soil

Faza rozwojowa roślin The developmental stages of plants	Kontrola	Pb	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola	F	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola	Se	NIR _{0,05} LSD _{0,05}	Kontrola	Izoproturon	NIR _{0,05} LSD _{0,05}
'Chrobre'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	176,2 ± 3,73 (100)	227,9 ± 1,85 (129,3)	2,67*	176,2 ± 3,73 (100)	229,7 ± 2,82 (130,4)	3,03*	176,2 ± 3,73 (100)	189,7 ± 1,58 (107,6)	1,83*	176,2 ± 3,73 (100)	235,0 ± 5,23 (133,4)	3,12*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	186,3 ± 6,26 (100)	219,1 ± 2,15 (117,6)	2,77*	186,3 ± 6,26 (100)	228,7 ± 2,75 (122,8)	3,78*	186,3 ± 6,26 (100)	189,8 ± 3,35 (101,9)	3,29*	186,3 ± 6,26 (100)	229,5 ± 4,48 (123,2)	3,85*
Krzewienie Tillering	197,9 ± 1,57 (100)	219,4 ± 1,36 (110,9)	2,54*	197,9 ± 1,57 (100)	221,4 ± 2,34 (111,9)	2,18*	197,9 ± 1,57 (100)	200,4 ± 3,98 (101,3)	r n.	197,9 ± 1,57 (100)	220,7 ± 7,68 (111,5)	r n.
'Skat'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	186,2 ± 5,73 (100)	213,9 ± 3,85 (114,9)	3,11*	186,2 ± 5,73 (100)	227,6 ± 3,24 (122,2)	3,87*	186,2 ± 5,73 (100)	187,2 ± 3,55 (100,5)	r n.	186,2 ± 5,73 (100)	235,8 ± 4,16 (126,6)	3,17*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	189,3 ± 4,28 (100)	212,3 ± 3,27 (112,15)	2,47*	189,3 ± 4,28 (100)	219,2 ± 2,69 (115,8)	3,45*	189,3 ± 4,28 (100)	191,3 ± 4,16 (101,1)	r n.	189,3 ± 4,28 (100)	229,7 ± 6,33 (121,4)	3,28*
Krzewienie Tillering	192,9 ± 3,37 (100)	216,4 ± 2,33 (112,2)	2,53*	192,9 ± 3,37 (100)	218,3 ± 3,31 (113,2)	3,29*	192,9 ± 3,37 (100)	194,2 ± 2,96 (100,7)	r n.	192,9 ± 3,37 (100)	206,8 ± 5,68 107,2	3,47*
'Dańkowskie Diament'												
Faza 2 liści Phase 2 leaves	187,2 ± 2,74 (100)	219,9 ± 2,84 (117,5)	2,32*	187,2 ± 2,74 (100)	236,7 ± 2,86 (126,4)	2,19*	187,2 ± 2,74 (100)	196,1 ± 2,45 (104,8)	2,38*	187,2 ± 2,74 (100)	221,8 ± 5,27 (118,5)	3,72*
Faza 3 liści Phase 3 leaves	194,3 ± 5,16 (100)	226,1 ± 3,25 (116,4)	3,19*	194,3 ± 5,16 (100)	236,1 ± 2,19 (121,5)	3,68*	194,3 ± 5,16 (100)	204,3 ± 3,96 (105,2)	3,89*	194,3 ± 5,16 (100)	225,5 ± 5,13 (116,1)	4,18*
Krzewienie Tillering	199,2 ± 2,57 (100)	211,4 ± 2,37 (106,1)	2,45*	199,2 ± 2,57 (100)	217,8 ± 3,46 (109,33)	3,23*	199,2 ± 2,57 (100)	202,0 ± 3,15 (101,4)	r n.	199,2 ± 2,57 (100)	221,3 ± 3,78 (111,1)	r n.

NIR – najmniejsza istotna różnica, przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$; * istotność różnic przy poziomie $\alpha < 0,05$; r n. – różnica nieistotna; \pm – odchylenie standardowe.
 LSD – least significant difference, with significance level $\alpha < 0.05$; * significance of differences at the level of $\alpha < 0.05$; r n. – nonsignificant difference; \pm – standard deviation.

WNIOSKI

1. Wprowadzenie do gleby ołowiu, fluoru oraz herbicydu Izoturon 500 SC istotnie wpływa na obniżenie wzrostu i spadek świeżej masy roślin, a także zmianę aktywności SOD u różnych odmian żyta w porównaniu z roślinami kontrolnymi.
2. Istotny statystycznie wzrost aktywności SOD, w porównaniu z aktywnością enzymu w roślinach kontrolnych, może świadczyć o znaczącym wpływie wprowadzonych do gleby związków na procesy wolnorodnikowe.
3. Oddziaływanie badanych związków na aktywność dysmutazy ponadtlenkowej w roślinach żyta wyraźnie zależy od rodzaju polutanta, odmiany żyta, a także od terminu pomiaru.
4. Izoproturon w największym stopniu zmienia aktywność SOD, natomiast selen w najmniejszym.
5. Odmiany żyta charakteryzują się różną tolerancją na wprowadzone do gleby substancje. Najbardziej wrażliwa okazała się odmiana 'Chobre'.

PIŚMIENNICTWO

- Abassi N.A., Kushad M.M., Endress A.G.** 1998. Active oxygen-scavenging enzymes activities in developing apple flowers and fruits. *Sci.Hort.* 74 (3), 183–194.
- Apel K., Hirt H.** 2004. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55, 373–399.
- Ashraf M., Harris P.J.C.** 2005. Abiotic stresses plant resistance through breeding and molecular approaches. New York, Food Products Press, 1–725.
- Bartosz G.** 2003. Druga twarz tlenu. Wolne rodniki w przyrodzie. PWN, Warszawa, 447.
- Beak K.H., Skinner D.Z.** 2003. Alteration of antioxidant enzyme gene expression during cold acclimation of near-isogenic wheat lines. *Plant Sci.* 165, 1221–1227.
- Beauchamp C., Fridovich I.** 1971. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Anal. Biochem.* 44 (1), 276–287.
- Candan N., Tarhan L.** 2003. The correlation between antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation levels in *Mentha pulegium* organs grown in Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} stress conditions. *Plant Sci.* 163, 769–779.
- Chlubek D., Stachowska E., Bober J.** 2001. Udział fluorków w reakcjach wolnorodnikowych i ich wpływ na aktywność enzymów antyoksydacyjnych. *Bromat. Chem. Toksykol.* 34 (3), 263–266.
- Dey S.K., Dey J., Patra S., Pothal D.** 2007. Changes in the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in wheat seedlings exposed to cadmium and lead stress. *Braz. J. Plant Physiol.* 19 (1), 53–60.
- Dubert F.** 1995. Wykorzystanie kultur *in vitro* w badaniach odporności roślin na działanie czynników stresowych, w: Ekofizjologiczne aspekty reakcji roślin na działanie abiotycznych czynników stresowych. Ogólnopolska konferencja, Kraków 23–25 listopada 1995. Red. S. Grzesiak, Z. Miszański. ZFR PAN, Kraków, 37–47.
- Gill S.S., Tuteja N.** 2010. Polyamines and abiotic stress tolerance in plants. *Plant Signal Behav.* 5 (1), 26–33.
- http://www.ptg.sggw.pl/images/Uziarnienie_PTG_2008.pdf.pdf. Dostęp na dzień 3.03.2011.

- Jiang N., Luo X., Zeng J., Yang Z.R., Zheng L.Y., Wang S.** 2010. Lead toxicity induced growth and antioxidant responses in *Luffa cylindrica* seedlings. *Int. J. Agr. Biol.* 12 (2), 205–210.
- Kabata-Pendias A., Pendias H.** 1999. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Warszawa, PWN, 398.
- Kubicka H.** 2004. Jęczmień, pszenica i żyto. *Zarys genetyki zbóż*. Red. A.G. Górny. IGR PAN, Poznań, 423.
- Lityński T., Jurkowska H., Gorchach E.** 1976. *Analiza chemiczno-rolnicza. Przewodnik metodyczny do analizy gleby i nawozów*. PWN, Warszawa,.
- Łata B.** 1998. Mechanizmy chroniące roślinę przed stresem oksydacyjnym, wywołanym niekorzystnymi warunkami środowiska. *Postępy Nauk Rol.* 6, 115–131.
- Małecka A., Tomaszewska B.** 2005. Reaktywne formy tlenu w komórkach roślinnych i enzymatyczne systemy obronne. *Postępy Biol. Komórki.* 32 (2), 311–325.
- Mittler R.** 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Sci.* 7 (9), 405–410.
- Małecka A., Jarmuszkiewicz W., Tomaszewska B.** 2001. Antioxidative defense to lead stress In subcellular compartments of pea root cells. *Acta Biochim. Pol.* 48 (3), 687–698.
- Molassiotis A., Sotiropoulos T., Tanou G., Diamantidis G., Therios I.** 2006. Boron-induced oxidative damage and antioxidant and nucleolytic responses in shoot tips culture of the apple rootstock EM9 (*Malus domestica* Borkh). *Environ. Exp. Bot.* 56, 54–62.
- Nowak J., Kąkiewicz K., Ligocki M.** 2004. Influence of selenium on oxidoreductive enzymes activity in soil and in plants. *Soil Biol. Biochem.* 36, 1553–1558.
- Paczkowska M., Kozłowska M., Goliński P.** 2007. Oxidative stress enzyme activity in *Lemna minor* L. exposed to cadmium and lead. *Acta Biol. Cracov., Ser. Bot.* 49 (2), 33–37.
- Rucińska R., Wapłak S., Gwóźdź E.A.** 1999. Free radical formation and activity of antioxidant enzymes in lupin roots exposed to lead. *Plant Physiol. Biochem.* 37 (3), 187–194.
- Vaidyanathan H., Sivakumar P., Chakrabarty R., Thomas G.** 2003. Scavenging of reactive oxygen species in NaCl-stressed rice (*Oryza sativa* L.) – differential response in salt-tolerant and sensitive varieties. *Plant Sci.* 165, 1411–1418.
- Verma S., Dubey R.S.** 2003. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Sci.* 164, 645–655.
- Wilde L.G., Yu M.** 1998. Effect of fluoride on superoxide dismutase (SOD) activity in germinating mung bean seedlings. *Fluoride* 31 (2), 81–88.
- Xue T., Hartikainen H., Piironen V.** 2001. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. *Plant Soil* 237, 55–61.