

Stomatálna charakteristika listov ovsu vystavených iónom kadmia

Beáta Piršelová¹
Roman Kuna¹
Ludmila Galuščáková¹
Libuša Lengyelová¹
Veronika Kubová¹
Marcel Roszival¹
Katarína Bojnanská²

¹ Katedra botaniky a genetiky, Fakulta prírodných vied a informatiky, Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre; Nábřeží mládeže 91, 94974, Nitra; bpirselova@ukf.sk, rkuna@ukf.sk, lgaluscakova@ukf.sk, llengyelova@ukf.sk, veronika.kubova@ukf.sk, marcel.roszival@ukf.sk

² Výskumný ústav rastlinnej výroby; Bratislavská cesta 122, 921 68 Piešťany, Slovenská republika; katarina.bojnanska@nppc.sk

Grant: APVV-18-0154; VEGA 1/0073/20

Názov grantu: Molekulárno-metabolomický prístup k beta-D-glukánu a jeho ochrannej funkcii v rastlinnom organizme; Ekologický potenciál vybraných poľnohospodárskych plodín pre zlepšenie kvality zaťažených pôd Slovenska
Oborové zamčrenie: ED – Fyziologie

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt Kadmium (Cd) patrí medzi rizikové prvky, ktoré výrazne zasahujú do potravinového reťazca. V danej štúdiu hodnotíme vplyv Cd v dávke 50 mg/kg pôdy na prieduchy a vodný režim piatich odrôd ovsu (*Avena sativa* L. cvs. Aragon, Bay Yan 2, Ivory, Racoon a Václav). Výsledky danej štúdie poukázali na vysokú variabilitu v počte aj veľkosti prieduchov závislú od genotypu a polohy prieduchov na listoch. Najmenej kovu (13,72 mg/kg sušiny) akumulovali výhonky odrody Bay Yan 2 a najviac (28,48 a 35,20 mg/kg sušiny) odrody Václav a Racoon. Obsah vody klesol v listoch odrôd Bay Yan 2 a Václav o 2,3 a 5,6 %, naopak v listoch odrody Ivory sa zvýšil o 2,4 %. Korelačné analýzy medzi sledovanými parametrami naznačili, že vyšší obsah Cd akumulovaný výhonkami spôsobuje pravdepodobne zatvorenie prieduchov a zadržiavanie vody v bunkách, avšak nerovnakou mierou na vrchnej a spodnej strane listovej čepele. Navyše daný mechanizmus zrejme nie je rovnako účinný u všetkých odrôd. Identifikácia tolerantných odrôd a mechanizmov ich tolerance voči Cd môže prispieť k využitiu ovsu v procese remediácie pôd a tvorby biobezpečných potravín.

Kľúčová slova epiderma, kadmium, prieduchy, ovos siaty, vodný režim

1. ÚVOD

Rastliny sú počas života nútené koexistovať s rôznymi biotickými a abiotickými stresormi, ktoré môžu za určitých podmienok vyvolať celú škálu patologických zmien. Ťažké kovy sú nebezpečné kontaminanty, ktoré sa môžu hromadiť v jednotlivých článkoch potravinového reťazca a ovplyvniť zdravie človeka. Na vstup a transport ťažkých kovov z pôdy do rastlín vplýva mnoho faktorov, ako napríklad pôdna pH, koncentrácia daného kovu v prostredí, množstvo anorganických a organických látok v prostredí, činnosť mikroorganizmov, druh alebo ontogenetické štádium rastliny (Masarovičová a Repčák, 2002; Rasafi a kol., 2022). Citlivosť na zvýšenú koncentráciu ťažkých kovov je pozorovateľná u väčšiny rastlinných druhov (Ernst a kol., 2004). Existuje však množstvo tolerantných druhov, schopných prosperovať na pôdach zamorených

ťažkými kovmi, pričom táto tolerancia môže byť medzidruhovo, dokonca aj vnútrodruhovo rozdielna (Rasafi a kol., 2022). Významnú úlohu zohráva tiež interakcia genotypu s podmienkami prostredia. U rôznych druhov môžu fungovať rôzne tolerančné mechanizmy, ktorých podstatou je buď neutralizácia toxických kovov v protoplaste s následným odstránením z bunky, spomaľovanie ich migrácie do metabolicky aktívnych častí rastlín, alebo minimalizácia ich toxických účinkov (Krzesłowska, 2011). Reakcie prieduchov na rôzne typy exogénnych stresorov sú považované za jeden z najdôležitejších evolučných procesov (Brodribb a McAdam, 2011), pretože predstavujú vstupnú bránu do rastlinného organizmu a jediné prerušenie inak kompaktnej pokožky. Okrem toho, že prieduchy regulujú prírjem CO₂ z prostredia (zatváraním a otváraním prieduchovej štrbiny) regulujú tiež mieru transpirácie, prostredníctvom ktorej ovplyvňujú viacero fyziologických a biochemických procesov, vrátane termoregulácie, hospodárenia s vodou, prírjmu živín a tiež fotosyntézy (Farooq a kol., 2009). Uzavretie prieduchov má na rastlinu nepriaznivé účinky a rastlina ich zatvára iba v nevyhnutných prípadoch, keď pozitívne účinky zadržiavania vody prevažujú nad negatívnymi účinkami stresu. Mechanizmus otvárania a zatvárania prieduchov je riadený fytohormónmi (najmä kyselinou abscisovou – ABA) a tiež rôznymi iónmi, najmä Ca²⁺ a K⁺. Veľkosť a hustota prieduchov sú považované za dôležité ukazovatele vplyvu stresového faktora na rastlinu, hoci je tejto problematike venovaná v stresovej fyziológii rastlín menšia pozornosť. Kadmium následkom svojej silnej interferencie s ABA, Ca²⁺ a K⁺ núti rastlinu zatvárať prieduchy, čím vyvoláva vodný stres a inhibuje metabolizmus listového mezofylu (Slováková a Mistrík, 2007). Vznikajú ROS, ktoré následne poškodzujú životne dôležité molekuly a obmedzujú produktivitu rastlín. Kadmium môže mať tiež vplyv na veľkosť a hustotu prieduchov, čo dokazuje viacero autorov (Aliu a kol., 2015; Kilic a Kilic, 2017). Rôznymi spôsobmi môžu na stres z kadmia zareagovať tiež bunky epidermy. Epidermálne bunky rastlín rastúcich v kontaminovanom prostredí často redukujú svoju veľkosť (Barceló a Poschenrieder, 1990), rovnako ako aj veľkosť intercelulárnych priestorov (Djebali a kol., 2005). Početné štúdie hodnotili doteraz vplyv rizikových prvkov na prieduchy a pokožku rastlín, avšak výsledky sú často kontroverzné zrejme aj preto, že výsledný efekt je

často determinovaný genotypom, dĺžkou pôsobenia rizikového prvku a jeho koncentráciou.

Ovos siaty (*Avena sativa* L.) z čeľade *Poaceae* (lipnicovité) je už dlhodobo vysoko cenenou obilninou, pretože nutričné zloženie jeho zŕn má priaznivé účinky na ľudské zdravie. V porovnaní s inými obilninami má ovos výrazne vyšší podiel esenciálnych aminokyselín a mastných kyselín, vlákniny, β -D-glukánu ako aj ďalších prospešných látok (napr. tokoferoly, avenantramidy a iné). Cieľom práce bolo zhodnotiť význam prieduchov v adaptácii vybraných genotypov ovsa na ióny kadmia.

2. MATARIÁL A METODIKA

2.1 Založenie nádobového pokusu

Zrná vybraných odrôd ovsa siateho (*Avena sativa* L. cvs. Aragon, Bay Yan 2, Ivory, Racoon a Václav) boli vysiate (po 10 ks) do plastových nádob o priemere 25 cm s obsahom komerčne dostupného pestovateľského substrátu Klasmann TS 2 (pH 6,5, EC v μ S 400, obsah celkového dusíka N v mg/l 140, obsah celkového fosforu P v mg/l 160, obsah draslíka K v mg/l 180) a umiestnili do rastovej komory s regulovanou teplotou 15 - 24 °C, vlhkosťou 67 - 82 % a fotoperiódou 10 h deň/8 h tma. Rastliny stresovaného variantu boli po 22 dňoch kultivácie, v štádiu 3. vyvinutého listu, vystavené iónom kadmia v dávke 50 mg/kg pôdy Cd^{2+} . Kadmium bolo aplikované vo forme roztoku dihydrátu chloridu kademnatého ($CdCl_2 \cdot 2H_2O$). Po 64 dňoch rastu sme uskutočnili nižšie uvedené analýzy, pričom vzorky boli odoberané z centrálnej časti druhého plne vyvinutého listu.

2.2 Stanovenie stomatálnych parametrov

Počet prieduchov, rovnako ako aj počet pokožkových buniek sme stanovovali odtlačkovou metódou (Cholvadová a kol., 2007) na vrchnej (adaxiálnej) a spodnej (abaxiálnej) strane plne vyvinutých listov z rastlín v rovnakom ontogenetickom štádiu. Preparát sme pozorovali za pomoci svetelného mikroskopu (Zeiss Axioplan 2) a kamery Sony DXC-S500. Počet prieduchov a epidermálnych buniek sme stanovovali v 24 zorných poliach (870 μm^2) ako aj kontrolných ako aj stresovaných rastlinách. Výsledné hodnoty sme prepočítali na 1 mm^2 listovej plochy. Následne sme v jednotlivých zorných poliach stanovili dĺžku a šírku prieduchov pomocou programu AxioVision AC.

Stomatálny index (v %) sme stanovovali podľa Kalinu a Slováka (2002) podľa vzorca:

$$I = \frac{S}{(E+S)} \times 100$$

I – stomatálny index

S – počet prieduchov nachádzajúcich sa na určitej ploche

E – počet epidermálnych buniek na určitej ploche.

2.3 Stanovenie obsahu kadmia a vody vo výhonkoch

Vysušené rastlinné pletivá (0,3 g) boli mineralizované vo vysokovýkonnom mirkovlnnom štiepnom systéme Ethos UP (Milestone Srl) v roztoku 5 ml $HNO_3 \geq 69,0\%$, 1 ml $H_2O_2 \geq 30\%$, (pre stopové analýzy) a 2 ml ultračistej vody (18,2 M Ω cm⁻¹; 25 °C). Následne boli vzorky za pomoci kvantitatívneho filtračného papiera (retencia častíc 12 - 15 μm) prefiltrované do odmerných

baniek a doplnené ultračistou vodou do objemu 50 ml. Analýza Cd prebiehala pomocou indukčne viazaného plazmovo-optického emisného spektrometra s axiálnou konfiguráciou plazmy (ICP OES 720, Agilent Technologies). Stanovenie obsahu prvkov prebehlo podľa Kováčika a kol. (2018). Obsah Cd bol stanovený v 1 opakovaní. Obsah vody v pletivách bol stanovený ako rozdiel obsahu sušiny a čerstvej hmotnosti listov z troch opakovaní experimentu.

2.4 Štatistické spracovanie výsledkov

Získané výsledky sme spracovali pomocou programu Microsoft Excel. Rozdiely vzniknuté medzi súbormi údajov boli vyhodnotené Studentovým T-testom pri hladine $p < 0,05$. Vzájomné vzťahy medzi vybranými parametrami (relatívne údaje získané vzhľadom na kontrolné vzorky) sme stanovili pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu.

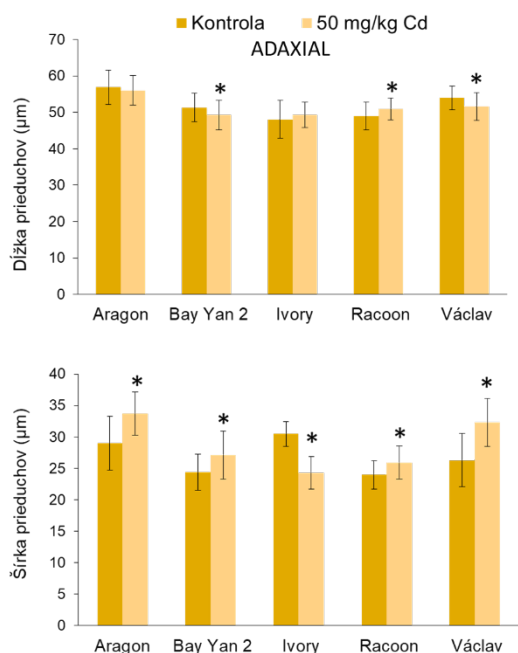
3. VÝSLEDKY

Po 42 dňoch pôsobenia kadmia sme hodnotili jeho vplyv na počet a veľkosť prieduchov a tiež na obsah vody v pletivách. Získané údaje sme podrobili korelačným analýzám.

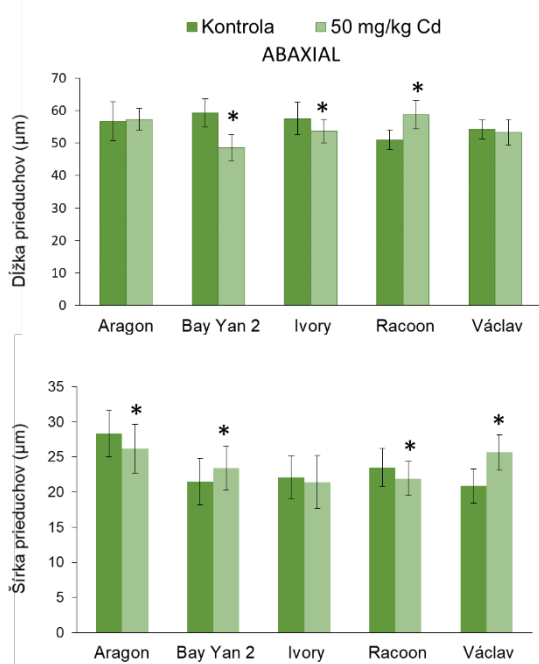
3.1 Vplyv kadmia na veľkosť prieduchov

Priemerná dĺžka a šírka prieduchov sa na vrchnej (adaxiálnej) a spodnej (abaxiálnej) strane stresovaných listov značne lišila. Zaznamenali sme zmeny v ich veľkosti v závislosti od odrody a strany listovej čepele (Obr. 1 a 2). V prípade odrody Aragon sme nezaznamenali žiadne štatisticky významné zmeny dĺžky prieduchov v závislosti od Cd alebo strany listu. V prípade odrody Bay Yan 2 stresovanej Cd sme pozorovali signifikantne kratšie prieduchy na adaxiálnej (o 4 %) aj abaxiálnej (o 18 %) strane listu. Dĺžka prieduchov odrody Ivory neprejavila na adaxiálnej strane štatisticky významné zmeny, na rozdiel od abaxiálnej strany, kde zníženie dĺžky v porovnaní s kontrolou predstavovalo 6,9 %. V odrode Racoon sa dĺžka prieduchov štatisticky významne zvýšila na oboch stranách listovej čepele. Prieduchy sa na adaxiálnej strane predĺžili vzhľadom ku kontrole o 4 % a na abaxiálnej o 15,2 %. Prieduchy boli taktiež signifikantne kratšie na adaxiálnej strane listovej čepele odrody Václav (4,7 %) stresovanej Cd. Táto zmena sa na abaxiálnej strane listov štatisticky významne nepotvrdila (Obr. 2).

Účinok Cd sa tiež signifikantne prejavil na šírke prieduchov všetkých testovaných odrôd ovsa na oboch stranách listovej čepele, okrem odrody Ivory, v prípade tejto odrody sa štatisticky významné zmeny nepotvrdili na abaxiálnej strane (Obr. 2). Na adaxiálnej strane listovej čepele tejto odrody sme však zaznamenali silný inhibičný účinok vplyvom kovu, ktorý predstavoval pokles šírky o 20,3 % v porovnaní s kontrolou. Naopak, u odrody Aragon sme zaznamenali signifikantne širšie prieduchy (o 16,3 %) na adaxiálnej strane, pričom abaxiálna strana mala prieduchy štatisticky preukazne užšie o 7,6 %. Pri odrode Bay Yan 2 sme vplyvom kovu zaznamenali zvýšenie šírky prieduchov na adaxiálnej (o 11,2 %) aj abaxiálnej strane (o 8,9 %) listovej čepele. Podobne ako odroda Bay Yan 2 reagovala tiež odroda Václav, u ktorej sme vplyvom Cd pozorovali širšie prieduchy na adaxiálnej (o 22,8 %) aj abaxiálnej strane (o 22,8 %) listu. Odroda Racoon sa reakciou na kov podobala odrode Aragon, adaxiálna strana listu mala výrazne širšie prieduchy (o 8,2 %) a naopak na abaxiálnej strane boli prieduchy v porovnaní s kontrolou štatisticky významne užšie (o 6,6 %) (Obr. 1 a 2).



Obr. 1: Dĺžka a šírka prieduchov na vrchnej (ADAXIAL) strane listov skúmaných genotypov ovsa siateho. Údaje predstavujú aritmetické priemery ± SDEV. * - štatisticky významný rozdiel oproti kontrole pri $p < 0,05$ (zdroj: vlastné spracovanie)

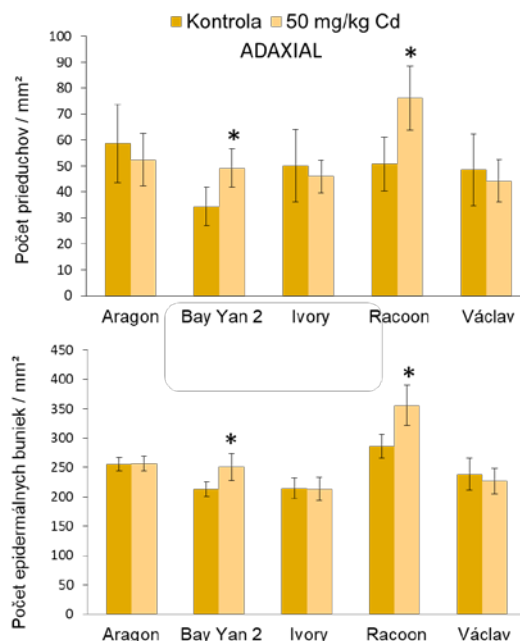


Obr. 2: Dĺžka a šírka prieduchov na spodnej (ABAXIAL) strane listov skúmaných genotypov ovsa siateho. Údaje predstavujú aritmetické priemery ± SDEV. * - štatisticky významný rozdiel oproti kontrole pri $p < 0,05$ (zdroj: vlastné spracovanie)

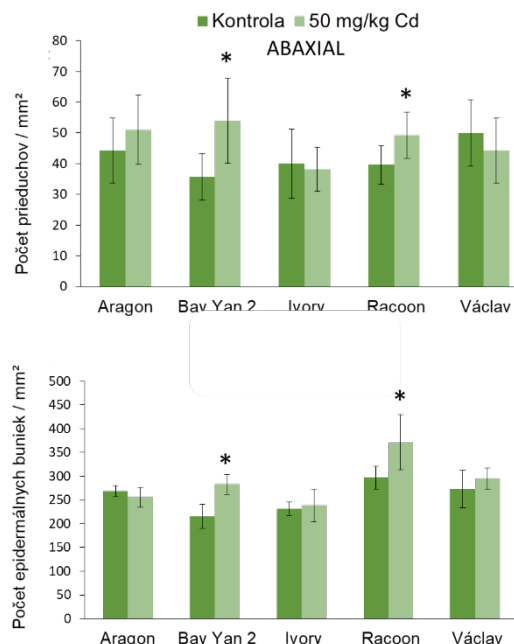
3.2 Vplyv kadmia na počet prieduchov a epidermálnych buniek

Štatisticky preukazné zmeny v počte prieduchov sme u rastlín stresovaných Cd zaznamenali v prípade odrôd *Bay Yan 2* a *Racoon* (Obr. 3, 4), došlo k nárastu počtu prieduchov na adaxiálnej strane

listov o 43 % a 51,1 % a na abaxiálnej strane k nárastu o 43 % a 24 %. Počet epidermálnych buniek taktiež vzrástol u týchto odrôd o 17,8 % a 24,5 % na adaxiálnej strane listu a o 31,1 % a 25 % na abaxiálnej strane (Obr. 3, 4).



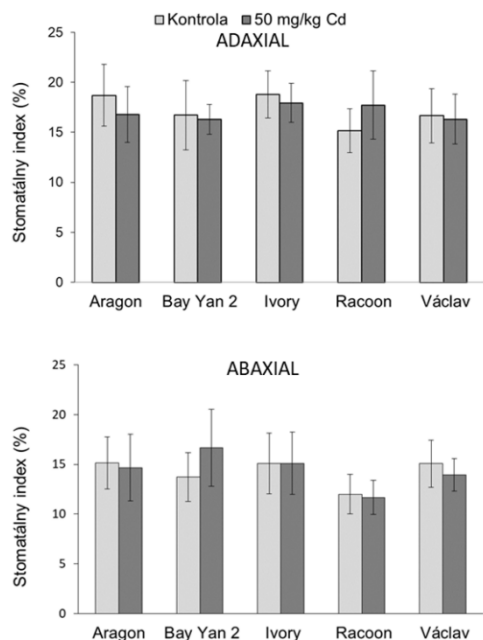
Obr. 3: Počet prieduchov a epidermálnych buniek na vrchnej (ADAXIAL) strane listov skúmaných genotypov ovsa siateho. Údaje predstavujú aritmetické priemery ± SDEV. * - štatisticky významný rozdiel oproti kontrole pri $p < 0,05$ (zdroj: vlastné spracovanie)



Obr. 4: Počet prieduchov a epidermálnych buniek na spodnej (ABAXIAL) strane listov skúmaných genotypov ovsa siateho. Údaje predstavujú aritmetické priemery ± SDEV. * - štatisticky významný rozdiel oproti kontrole pri $p < 0,05$ (zdroj: vlastné spracovanie)

3.3 Vplyv kadmia na stomatálny index

Napriek tomu, že u odrôd *Bay Yan 2* a *Racoon* nastali vplyvom Cd výrazné zmeny v počte prieduchov a počte pokožkových buniek na jednotku plochy, ani u jednej z uvedených odrôd sa významne nezmenil stomatálny index. Rovnako sme štatisticky preukazné zmeny nezaznamenali ani u zvyšných 3 genotypov ovsu (Obr. 5).



Obr. 5: Stomatálny index pre vrchnú (ADAXIAL) a spodnú (ABAXIAL) stranu listovej čepele skúmaných genotypov ovsu siateho. Údaje predstavujú aritmetické priemery \pm SDEV (zdroj: vlastné spracovanie)

2.4 Obsah kadmia a vody vo výhonkoch

Akumulované množstvo Cd vo výhonkoch sa líšilo v závislosti od odrody. Obsah Cd vo výhonkoch sa pohyboval v rozmedzí 13,17 – 36,63 mg/g sušiny. Najmenej kovu (13,17 mg/kg sušiny) akumulovali výhonky odrody *Aragon* a najviac (25,92 a 36,63 mg/kg sušiny) odrody *Racoon* a *Václav* (Tabuľka 1). Obsah vody sa taktiež menil v závislosti od odrody, v prípade odrody *Ivory* došlo k nárastu o 2,4 % a v prípade odrôd *Bay Yan 2* a *Václav* došlo k poklesu o 2,3 a 5,6 %.

Tabuľka 1: Obsah kadmia (Cd) v listoch rôznych odrôd ovsu v mg/g sušiny (zdroj: vlastné spracovanie)

	Kontrola	Cd
Aragon	0,31	13,17
Bay Yan 2	0,42	13,40
Ivory	0,24	20,27
Václav	1,01	36,63
Racoon	0,24	25,92

Tabuľka 2: Obsah vody v listoch ovsu siateho (g/g čerstvej hmoty) (zdroj: vlastné spracovanie)

	Kontrola	Cd
Aragon	0,87 \pm 0,02	0,85 \pm 0,03
Bay Yan 2	0,91 \pm 0,01	0,88 \pm 0,01 *
Ivory	0,86 \pm 0,01	0,89 \pm 0,01 *
Václav	0,90 \pm 0,01	0,85 \pm 0,01 *
Racoon	0,83 \pm 0,02	0,85 \pm 0,00

Údaje predstavujú aritmetické priemery \pm SDEV. * - štatisticky významný rozdiel oproti kontrole pri $p < 0,05$.

4.5 Korelačné vzťahy

Korelačnými analýzami sme hodnotili vzťah medzi obsahom Cd v pletivách jednotlivých odrôd ovsu a testovanými parametrami, ako aj medzi obsahom vody a parametrami prieduchov. Obsah Cd vo výhonkoch pozitívne koreloval so šírkou prieduchov na adaxiálnej ($R = 0,206$) aj na abaxiálnej strane listov ($R = 0,800$) a negatívne koreloval s dĺžkou a počtom prieduchov na oboch stranách listov (Tab. 3). Negatívny vzťah sme zaznamenali aj medzi obsahom Cd a obsahom vody v listoch ($R = -0,570$). Vysoko pozitívnu, štatisticky významnú koreláciu sme zaznamenali medzi obsahom vody a dĺžkou prieduchov na vrchnej strane listu ($R = 0,947$). Obsah vody negatívne koreloval so šírkou prieduchov na adaxiálnej ($R = -0,827$) aj abaxiálnej ($R = -0,788$) strane listu (Tab. 3).

Tabuľka 3: Korelačné koeficienty vyjadrujúce vzťah medzi sledovanými parametrami (zdroj: vlastné spracovanie)

Vzťah medzi parametrami	ADAXIAL	ABAXIAL
	korelačný koeficient	korelačný koeficient
Obsah Cd x počet prieduchov	-0,65	-0,75
Obsah Cd x dĺžka prieduchov	-0,499	-0,176
Obsah Cd x šírka prieduchov	0,206	0,800
Obsah Cd x obsah vody	-0,570	
Obsah vody x počet prieduchov	0,214	0,004
Obsah vody x dĺžka prieduchov	0,947 *	0,335
Obsah vody x šírka prieduchov	-0,827	-0,788
Dĺžka prieduchov x šírka prieduchov	-0,654	-0,408

* - štatisticky významná korelácia pri $p < 0,05$

5. DISKUSIA

Prieduchy predstavujú mikroskopické póry pokrývajúce epidermu listov, ktorých parametre sa líšia v závislosti od zmien podmienok prostredia, v ktorom sa nachádzajú. Veľkosť prieduchov je v úzkom vzťahu s prieduchovou štrbinou a tiež s intenzitou transpirácie a fotosyntetickou asimiláciou. Hustota, rovnako ako veľkosť prieduchov je dôležitým ukazovateľom vplyvu stresového faktora na rastlinu ako aj tolerance rastlín na stres (Gostin, 2009; Negi a kol., 2014; Esmaeilpour a kol., 2016). Zmenšenie počtu a veľkosti prieduchov a tiež ich uzatvorenie bolo napr. prejavom odolnosti *Setaria veridis* voči Cd (Kaznina a kol., 2014). V rámci našej štúdie sme zaznamenali vysokú variabilitu v počte aj veľkosti prieduchov závislú od genotypu a polohy prieduchov na listoch. Vplyvom Cd došlo k predĺženiu, aj ku skráteniu prieduchov, navyše nerovnakou mierou na oboch stranách listovej čepele. Podobný jav sme pozorovali aj v prípade epidermálnych buniek. Doterajšie výsledky o vplyve rizikových prvkov na epidermu listov sú protichodné. Zmenšenie prieduchov vplyvom Cd zaznamenali aj Kilic a Kilic (2017) na oboch stranách listov medovky lekárskej (*Melissa officinalis* L.). Kastori a kol. (1992) pozorovali tiež významné zmenšenie prieduchov vplyvom Cd (ale tiež Zn, Cu a Pb) u rastlín slnečnice ročnej (*Helianthus annuus* L.), čo pripisovali výraznému zníženiu miery transpirácie a obsahu vody v pletivách. Nami stanovené korelačné analýzy medzi sledovanými parametrami tiež naznačili, že vyšší obsah Cd akumulovaný výhonkami spôsobuje pravdepodobne zatvorenie prieduchov a zadržiavanie vody v bunkách (Tab. 3). Dané vzťahy sú však rôzne silné na adaxiálnej a abaxiálnej strane listu, čo naznačuje rozdiely dvoch strán listu v adaptácii na zmenené podmienky.

Štatisticky významné zvýšenie počtu prieduchov na oboch stranách listu sme zaznamenali v prípade odrôd *Bay Yan 2* a *Racoon*. Rovnako rástol počet epidermálnych buniek u týchto odrôd. Zvyšovanie počtu prieduchov v kontexte zvyšujúcej sa koncentrácie

toxických kovov v prostredí bolo zaznamenané aj v prípade slnečnice, kukurice alebo podzemnice olejnej (Kastori a kol., 1992; Shi a Cai, 2009; Aliu a kol., 2015). Na druhej strane Kilic a Kilic (2017) poukázali na lineárny pokles počtu prieduchov na oboch stranách epidermy vplyvom dávok Cd 10-30 mg/kg pôdy. Zaznamenaná veľká variabilita v reakcii prieduchov na Cd je pravdepodobne daná genotypom, ktorý determinuje mieru akumulácie Cd vo výhonkoch. Nemožno však vylúčiť aj možný vplyv nerovnomerného osvetlenia listovej čepele počas experimentu.

Aplikovaná dávka Cd štatisticky významne neovplyvnila stomatálny index u žiadneho z testovaných genotypov. Zaznamenané minimálne zmeny v hodnotách stomatálneho indexu v podmienkach stresu sú v súlade s pozorovaniami iných autorov (Haworth a kol., 2012). Obsah Cd vo výhonkoch sa líšil medzi odrodami, najviac Cd akumulovali vo svojich pletivách odrody *Raccon* a *Václav*. Obsah vody sa taktiež menil v závislosti od odrody, v prípade odrody *Ivory* došlo k nárastu o 2,4 % a v prípade odrôd *Bay Yan 2* a *Václav* došlo k poklesu o 2,3 a 5,6 %. Na pomerne slabý vzťah medzi obsahom vody a obsahom Cd vo pletivách poukázali aj korelačné analýzy (Tab. 3). Štúdie Marchiol a kol. (1996) poukázali na to, že hospodárenie s vodou v podmienkach pôsobenia Cd závisí od jeho koncentrácie. Nanomolárne až mikromolárne koncentrácie Cd vyvolali silnú inhibíciu otvárania prieduchov, pričom pri vyšších koncentráciách bol inhibičný účinok postupne potláčaný. Na druhej strane, podľa štúdie Perfus-Barbeocha a kol. (2002) Cd znižuje obsah vody a interaguje so stomatálnou reguláciou v koncentračne závislom spôsobe, ktorý je prejavom toxicity Cd. Pri vyšších dávkach Cd dochádza k vädnutiu a hydropasívnemu uzatváraniu prieduchov (Poschenrieder a kol., 1989). Zníženie relatívneho obsahu vody vplyvom Cd bolo pozorované aj v prípade kapusty, bazalky a pšenice (Moussa a El-Gamal, 2009; Shiyab, 2015; Nazarian a kol., 2016).

6. ZÁVER

Výsledky danej štúdie poukázali na vysokú variabilitu v počte aj veľkosti prieduchov závislú od genotypu a polohy prieduchov na listoch. Signifikantné zmeny sme zaznamenali u všetkých genotypov, minimálne v dvoch sledovaných parametroch, avšak ani jedna odroda nezmenila vplyvom kadmia stomatálny index. Sledované odrody ovsa sa líšili akumuláciou kadmia vo výhonkoch, pričom najvyšší akumuláčny potenciál prejavili odrody *Raccon* a *Václav*. Korelačné analýzy medzi sledovanými parametrami naznačili, že vyšší obsah Cd akumulovaný výhonkami spôsobuje pravdepodobne zatvorenie prieduchov a zadržiavanie vody v bunkách, avšak nerovnakou mierou na vrchnej a spodnej strane listovej čepele. Navyše daný mechanizmus zrejme nie je rovnako účinný u všetkých odrôd. Zhodnotenie veľkosti (šírky) prieduchových štrbín a ďalších fyziologických a biochemických parametrov (napr. obsahu fotosyntetických pigmentov alebo intenzity transpirácie) by mohlo prispieť k hlbšiemu pochopeniu pozorovaných zmien.

Zdroje

1. ALIU, S. a kol. 2015. Stomatal characteristics and their relationship to heavy metals in maize (*Zea mays* L.) seedlings. In *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 13(2), s. 168-171.
2. BARCELÓ, J. a POSCHENRIEDER, C. 1990. Plant water relations as affected by heavy metals stress: A review. In *Journal of Plant Nutrition*, 13(1), s. 1-37.
3. BRODRIBB, T. J. a McADAM, S. A. M. 2011. Passive origins of stomatal control in vascular plants. In *Science*, 331, s. 582-585.
4. DJEBALI, W. a kol. 2005. Ultrastructure and lipid alterations induced by cadmium in tomato (*Lycopersicon esculentum*) chloroplast membranes. In *Plant Biology*, 7(4), s. 358-368.
5. ERNST, W. H. O. a kol. 2004. Aspects of ecotoxicology of heavy metals in the Harz region – a guided excursion. In *Landbauforschung Völkenrode*, 54, s. 53 – 71.
6. ESMAELPOUR, A. a kol. 2016. Variation in biochemical characteristics, water status, stomata features, leaf carbon isotope composition and its relationship to water use efficiency in pistachio (*Pistacia vera* L.) cultivars under drought stress condition. In *Scientia Horticulturae*, 211, s. 158-166.
7. FAROOQ, M. a kol. 2009. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. In *Agronomy for Sustainable Development*, 29, s. 185-212.
8. GOSTIN, I. N. 2009. Air pollution effects on the leaf structure of some Fabaceae species. In *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37, s. 57-63.
9. HAWORTH, M. – ELLIOTT-KINGSTON, C. – McELWAIN, J. C. 2012. Co-ordination of physiological and morphological responses of stomata to elevated (CO₂) in vascular plants. In *Oecologia*, 171(1), s. 71-82.
10. CHOLVADOVÁ, B. – ERDELSKÝ, K. – MASAROVIČOVÁ, E. 2007. Praktikum z fyziológie rastlín. Bratislava: Univerzita Komenského, 2007, 136 s. ISBN 978-80-223-2285-0.
11. KALINA, J., SLOVÁK, V. 2002. The inexpensive tool for the determination of projected leaf area. In *10 Years of Global Change Research in the Czech Republic*, Ostravice, The Czech Republic, p. 22-25.
12. KASTORI, R. – PETROVIĆ, M. – PETROVIĆ, N. 1992. Effects of excess lead, cadmium, copper and zinc on water relations in sunflower. In *Journal of Plant Nutrition*, 15, s. 2427-2439.
13. KAZNINA, N a kol. 2014. The resistance of plants *Setaria veridis* (L.) Beauv. to the influence of cadmium. In *Biology Bulletin*, 41(5), s. 428-433.
14. KILIC, S. a KILIC, M. 2017. Effects of cadmium-induced stress on essential oil production, morphology and physiology of lemon balm (*Melissa officinalis* L., Lamiaceae). In *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(3), s. 1653-1669.
15. KOVÁČIK, A. a kol. 2018. Trace metals in the freshwater fish *Cyprinus carpio*: Effect to serum biochemistry and oxidative status markers. In *Biological Trace Element Research*, 188(2), s. 494-507.
16. KRZESŁOWSKA, M. 2011. The wall cell in plant cell response to trace metals: Polysaccharide remodelling and its role in defense strategy. In *Acta Physiologica Plantarum*, 33, s. 35–51.
17. MARCHIOL, L. a kol. 1996. Physiological responses of two soybean cultivars to cadmium. In *Journal of Environmental Quality*, 25(3), s. 562-566.
18. MASAROVIČOVÁ, E. a REPČÁK, M., a kol. 2002. Fyziológia rastlín. 1. vyd. Bratislava: Univerzita Komenského, 2002. 303 s. ISBN 80-223-1615-6.
19. MOUSSA, H.R. a EL-GAMAL, S.M. 2009. Role of salicylic acid in regulation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.). In *Acta Agronomica Hungarica*, 57(3), s. 321–333.
20. NAZARIAN, H. – AMOUZGAR, D. – SEDGHIANZADEH, H. 2016. Effects of different concentrations of cadmium on growth and morphological changes in basil (*Ocimum basilicum* L.). In *Pakistan Journal of Botany*, 48(3), s. 946-952.
21. NEGI, J. a kol. 2014. New approaches to the biology of stomatal guard cells. In *Plant Cell Physiology*, 55, s. 241-250.
22. PERFUS-BARBEOCH, L. a kol. 2002. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. In *The Plant Journal*, 32(4), s. 539–548.

23. POSCHENRIEDER, C. – GUNSE, B. – BARCELO´, J. 1989. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. In *Plant Physiol*, 90, s. 1365–1371.
24. SHI, G. a CAI, Q. 2009. Leaf plasticity in peanut (*Arachis hypogaea* L.) in response to heavy metal stress. In *Environmental and Experimental Botany*, 67, s. 112-117.
25. SHIYAB, S. 2015. Impact of cadmium accumulation on physiological characteristics of two cabbage varieties during phytoremediation. In *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 13(2), s. 262 - 268.
26. SLOVÁKOVÁ, Ľ. a MISTRÍK I., 2007. Fyziologické procesy rastlín v podmienkach stresu. 1. vyd. Bratislava: Univerzita Komenského, 2007. 238 s. ISBN 978-80-223-2322-2.
27. RASAFI, T. El. a kol. 2022. Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(5), s. 675-726.