

SELEN V VODNIH IN KOPENSKIH RASTLINAH

SELENIUM IN WATER AND IN TERRESTRIAL PLANTS

Lea LUKŠIČ¹ & Mateja GERM¹

<http://dx.doi.org/10.3986/fbg0034>

IZVLEČEK

Selen v vodnih in kopenskih rastlinah

Tako vodne kot kopenske rastline so sposobne privzeti selen iz okolja. Sposobnost privzema selen se med vrstami in skupinami rastlin razlikuje. Rastline iz tal privzemajo selen prvenstveno v obliki selenata, ki ga nato pretvorijo v selenit in selenove-aminokisliline, kot sta selenometionin in selenocistein. Zaradi različnih antropogenih dejavnikov in predvsem dejavnosti človeka, se povečuje obremenjenost vodnih virov s selenom. Vodne rastline, ki so sposobne privzemati večje količine selen iz vode, lahko uporabimo za čiščenje s selenom obremenjenih umetno ustvarjenih in naravnih vodnih teles. Služijo lahko tudi kot bioindikatorji obremenjenosti s selenom. Selen ima pri kopenskih rastlinah pozitiven učinek na rast rastlin in dozorevanje semen. Pozitivni učinki selen se odražajo tudi v večji zaščitenosti rastlin pred ultravijoličnim sevanjem, mrazom, sušo in zmanjšanim privzemom težkih kovin iz tal ter večjo zaščitenostjo rastlin pred patogeni in rastlinojedci. Prisotnost selen v kmetijskih rastlinah vpliva na zmanjšanje proizvodnje rastlinskega hormona etilena, ki je odgovoren za senescenco in zorenje plodov. Selen tako lahko prispeva tudi k daljši obstojnosti plodov. Rastline, ki imajo večjo sposobnost za privzem selen iz tal, lahko uporabimo tudi za fitoremediacijo s selenom onesnaženih tal. Poznavanje načinov privzema in akumulacije selen v vodne in kopenske rastline je ključno za razumevanje kroženja selen v okolju.

Ključne besede: selen, vodne rastline, kopenske rastline

ABSTRACT

Selenium in water and in terrestrial plants

Aquatic as well as terrestrial plants are able to uptake selenium from the environment. The ability to uptake selenium differs between plants. Plants uptake selenium primarily as a selenate, which is then converted into selenite and selenium-amino acids, such as selenomethionine and selenocysteine. Due to various anthropogenic factors and man's activity, pollution of water sources with selenium is increasing. Aquatic plants that are capable of absorbing selenium from water can be used for purifying waters contaminated with selenium in artificial and natural water bodies. In water bodies they can also be used as bioindicators of pollution with selenium. Selenium has a positive effect on plant growth and maturation of seeds in terrestrial plants. Positive effects of selenium are also shown in the increased protection of plants against ultraviolet radiation, cold, drought and reduced uptaking the heavy metals from the soil, and greater protection of plants against pathogens and herbivores. The presence of selenium in agricultural plants lowers the production of plant hormone - ethylene, which is responsible for senescence and ripening of the fruits. Selenium thus can also contribute to longer stability of plant fruits. Plants that have greater ability to uptake selenium from the soil can also be used for phytoremediation with selenium contaminated soils. Knowledge of the techniques of absorption and accumulation of selenium in aquatic and terrestrial plants are important to understand the transport of selenium in the environment.

Key words: selenium, water plants, terrestrial plants

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Jamnikarjeva 101, SI-1001 Ljubljana, Slovenija*, e-mail: nutridharma@gmail.com

1 UVOD

Elementarni selen je siva, žveplu podobna polkovina. V periodnem sistemu elementov je v šesti glavni skupini. Selen je leta 1817 odkril švedski kemik Jons Berzelius in v grškem jeziku pomeni Mesec (KAČ 2001). Povprečna koncentracija selena v tleh na Zemlji je 0,4 mg/kg. V tleh, bogatih s selenom, pa koncentracija selena lahko niha od >2 do 5000 mg/kg (HARTIKAINEN 2005). V Slovenji je selena v tleh malo, vsebnosti so navadno nižje od 0,1 mg/kg, ponekod pa vsebnost selena v tleh doseže tudi vrednosti od 0,3 do 0,7 mg/kg (GOLOB 2017). Količina selena, ki je prisotna v tleh, je odvisna od vrste tal, organske snovi v tleh in padavin (SORS et al. 2005). Gorate države kot so Finska, Švedska in Škotska, imajo navadno pomanjkanje selena v tleh, med tem ko imajo sušna območja običajno večje količine selena v tleh. V državah zahodne in srednje Evrope, med katere spada tudi Slovenija, selena v tleh navadno primanjkuje (PIRC & ŠAJN 1997). Rastline so iz tal sposobne črpati selen in ga pretvoriti v organo-selenove spojine. Vežejo lahko nekatere strupene kovine, kot so svinec, živo srebro, kadmij, nikelj in aluminij (WU et al. 2016). Selen je v večini rastlin prisoten v organski obliki (PUCCINELLI et al. 2017). Sposobnost privzema selena se med različnimi vrstami rastlin razlikuje.

Nanjo vpliva tudi koncentracija selena v tleh, lastnost tal in kemijska oblika selena (ZHU et al. 2009; BANUELOS et al. 1990). Vsebnost selena v listih večine rastlin, ki nimajo večje sposobnosti za akumulacijo selena, je navadno pod 100 mg Se/kg SM (suhe mase). Samo določene rastlinske vrste, ki rastejo v območjih z veliko selenom, so sposobne akumulirati večje količine selena v tkivih. Rastline so označene kot hiperakumulatorji selena, v primeru, da so sposobne akumulirati več kot 1000 mg Se/kg SM (ELLIS & SALT 2003). V vodnih okoljih je selen prisoten v različnih kemijskih oblikah. Najdemo ga v elementarni obliki, kot selenit, selenat ali v obliki seleno-aminokislin, kot sta selenometionin in selenocistein, v katerih selen zamenja žveplo (BRADLEY 2017). Vodne rastline primarno privzemajo selen iz vodnega okolja v obliki selenata in selenita. Poznavanje mehanizmov privzema in akumulacije selena v vodne rastline je ključna za razumevanje kroženja selena v vodnih ekosistemih. Visoke vsebnosti selena pa lahko zmanjšajo rast vodnih rastlin. Nekatere mikroalge in kopenske rastline iz družine križnic (*Brassicaceae*) imajo sposobnost pretvorbe selena v manj toksične hlapne Se snovi (SCHIAVON et al. 2017; GERM et al. 2007).

2 VODNE RASTLINE

Makrofiti, kot z drugo besedo imenujemo vodne rastline, so fotosintezni organizmi, ki so dovolj veliki, da jih v vodi lahko opazimo s prostim očesom. V skupini makrofitov najdemo tako cvetnice kot praproti, mahove in alge (GERM 2009). Glede na način pritrjanja in položaja v vodnem stolpcu vodne rastline delimo na potopljene ukoreninjene, plavajoče ukoreninjene, plavajoče neukoreninjene in emerzne makrofite. Makrofitom, ki plavajo na vodni gladini ali so potopljeni, pa pravimo tudi hidrofiti ali prave vodne rastline. Nekatere vodne rastline imajo amfibijski značaj (COOK 1999; GERM 2013). Vodne rastline imajo pomembno ekološko vlogo, saj omogočajo nastanek raznovrstnih življenjskih prostorov in tako povečajo biotsko pestrost v vodnem ekosistemu. Vodne rastline so primarni proizvajalci, omogočajo sprejem in vezavo sončne energije, so pa tudi vir hrane drugim organizmom v vodi (BORNETTE & PUIJALON 2009). Vodne rastline so pomembne tudi zato, ker utrjujejo substrat

in bregove jezer in rek, vplivajo na valovanje in hitrost toka vode. V sestojih makrofitov se kopičijo mulj, pesek in prod, zadržijo se tudi hranila, strupene snovi in mikroorganizmi (GERM 2009). Količina hranil, ki jo makrofiti vežejo iz vode, je odvisna od gostote in sestave sestaja ter njegove sezone variabilnosti. Sposobnost makrofitov za vezavo hranil iz vode prispeva tudi k čiščenju vode. V primeru, da je vnos hranil ali določene snovi v vodi prevelik, je čistilna sposobnost makrofitske vegetacije presežena, to pa vodi v slabšanje kakovosti vode (TANG et al. 2017). Po drugi strani pa lahko makrofiti povzročajo tudi evtrofikacijo vodnega okolja z mobilizacijo hranil iz talnega substrata in kot vir hrane po njihovem odmiranju. Vrstna sestava makrofitov lahko nakazuje tudi na stanje vodnega okolja. Določene vrste makrofitov imajo namreč zelo nizko raven strpnosti do povečanega onesnaženja in tako lahko služijo kot bioindikatorji (TANG et al. 2017).

3 SELEN V VODNIH RASTLINAH

Na povečanje vsebnosti selena v atmosferi vplivajo naravni in antropogeni dejavniki, ki imajo pomembno vlogo pri bio-geo-kemičnem kroženju selena v okolju. V podtalnici vsebnost selena narašča predvsem kot posledica pretirane uporabe gnojil, ki vsebujejo selen (WINKEL et al. 2012). Selen je bil v vodnih virih ZDA kot okoljski problem prepoznan že od poznih petdesetih let preteklega stoletja. Skrb glede onesnaženosti s selenom pa je vse od takrat naraščala zaradi povečane mobilizacije in koncentracije v vodnih ekosistemih predvsem zaradi antropogenih dejavnikov (MAIER & KNIGHT 1994). V podtalni vodi v Belgiji je bila, kot posledica gnojenja z gnojili, ki vsebujejo selen, izmerjena vsebnost selena 0,12 µg/L v Franciji 2,4 - 40 µg/L (MEHDI et al. 2013) v Indiji pa kar 341 µg/L (BAJAJ et al. 2011). Kot posledica človeške dejavnosti se povečuje tudi onesnaževanje s selenom v površinskih vodah, ki je v zadnjem času večje kot kdaj koli. Posledično se predvideva, da bi selen lahko postal eden od najbolj dolgoročno resnih onesnažil za površinske vode (LEMLY et al. 2004). Vsebnost selena v pitnih vodah ne sme preseči 10 µg/L (GORE et al., 2010), ravno tako je Svetovna zdravstvena organizacija (WHO) kot najvišjo dopustno vsebnost selena v pitni vodi določila 10 µg/L (WHO 2011). Povprečna vsebnost selena v morski vodi je ocenjena na 0,09 µg/L, v ostalih naravnih vodnih virih pa je povprečna vsebnost selena ocenjena na od 0,1 do 100 µg/L, v večini primerov je koncentracija selena pod 0,3 µg/L (FORDYCE 2005). Sposobnost makrofitov za privzem hranil iz vodnega okolja lahko uporabimo tudi za čiščenje umetnih in naravnih vodnih teles. Vodne rastline jemljejo hranila iz sedimenta in vode, kar je pomembno pri čiščenju vodnih ekosistemov. Izsledki raziskav kažejo, da so rastline dovolj učinkovite za čiščenje manj onesnaženih vodnih ekosistemov, pri bolj onesnaženih vodnih ekosistemih pa vodne rastline niso dovolj učinkovite (TANG et al. 2017). Ugotavljali so, kako vodni rastlini kodravi dristavec (*Potamogeton crispus*) in obmorska rupija (*Ruppia maritima*) akumulirata selen iz kmetijskih odcednih voda. Poskus so izvajali na polju in v laboratoriju. V kmetijskih odcednih vodah so poleg selenovih spojin določili tudi visoke koncentracije kloridnih in sulfatnih soli. Ugotovili so, da imata kodravi dristavec in obmorska rupija, ki sta rastli na poskusnem polju, podobno sposobnost za privzem selena. Bistveno večja koncentracija selena pa je bila v primerjavi z ostalimi deli rastlin pri obeh vrstah ugotovljena v koreninah rastlin. Ugotovili so tudi, da je kodravi dristavec v koreninah akumuliral več selena kot obmorska rupija. V rastlinah se je selen nahajal v obliki Se-aminokislin, v

vodni raztopini pa kot organski Se (Wu & Guo 2002).

V poskusu so preučevali, kako vsebnost sulfata, ki je znan antagonist selenata, vpliva na privzem selena v rastline obmorske rupije, ki raste v umetnih ribnikih in predstavlja hrano številnim pticam. Merili so skupno vsebnost selena v rastlini, vsebnost selenata, selenita in Se-metionina. Ugotovili so, da obmorska rupija privzema več Se-metionina, ne glede na vsebnost sulfata v vodi, kot privzema selenata ali selenita. Ugotovili so tudi, da je bil privzem selenata v rastline 2-krat večji ob nizki vsebnosti sulfata v vodi, kot ob visoki vsebnosti sulfata v vodi, kar nakazuje na antagonizem med selenatom in sulfatom (BAILEY et al. 1995).

Preučevali so tudi privzem selenita Se (IV) v tri različne vodne rastline klasasti rmanec (*Myriophyllum spicatum*), navadni rogolist (*Ceratophyllum demersum*) in preraslolistni dristavec (*Potamogeton perfoliatus*) in vpliv selenita na njihove fiziološke in biokemične značilnosti. Vodne rastline so gojili na prostem v semi-nadzorovanih razmerah v vodni raztopini, ki je vsebovala Na-selenit v koncentraciji 20 µg Se/L ali 10 mg Se/L. V poskusu so ugotovili, da je višja koncentracija selena zmanjšala fotokemično učinkovitost fotosistema II vseh treh vodnih rastlin, nižja koncentracija selena v vodni raztopini pa ni imela značilnega vpliva na nobeno od treh preučevanih vrst. Ugotovili so tudi, da je višja koncentracija selena v vodni raztopini zmanjšala respiratorni potencial pri klasastem rmancu. V večini primerov je Se (IV) v rastlinah klasastega rmanca in navadnega rogolista povečal vsebnost klorofila, v rastlinah preraslolistnega dristavca pa je vplival na zmanjšanje vsebnosti klorofila *a*. Koncentracija selena v rastlinah, ki so rasle v vodni raztopini, ki je vsebovala 10 mg Se (IV)/L, je bila v klasastem rmancu med 436 in 839 µg Se/g SM, v navadnem rogolistu med 319 in 988 µg Se/g SM in v preraslolistnem dristavcu med 310 in 661 µg Se/g DM. Vsebnost topnega selena v encimskih ekstraktih rastlin, obravnavanih z višjo koncentracijo selena, je bila 27 % za klasasti rmanec, 41 % za navadni rogolist in 35 % za preraslolistni dristavec. Ugotovili so, da se je Se (IV) v rastlinah večinoma pretvoril v netopni selen (MECHORA et al. 2013).

V Indiji so preučevali sposobnost dveh vrst vodnih rastlin širokolistnega rogoza (*Typha latifolia*) in navadnega trsta (*Phragmites australis*) za fitoremediacijo s selenom onesnaženih vodotokov. V umetno ustvarjena vodotoka so neprekinjeno dovajali selen (20,4 µg Se/L). Sestoj širokolistnega rogoza in navadnega trsta sta bila izpostavljena enakim pretokom v vodotoku v 24 urah. Ugotovili so, da je selen skozi rastlinski sestoj širokolistnega rogoza prehajal hitreje, kot skozi ra-

stlinski sestoj navadnega trsta, v katerem je uspeval. Izmerili so, da je okoli 54% selena prešlo skozi rastlinski sestoj širokolistnega rogoza. V vodotoku, v katerem so gojili navadni trst, je bil selen iz vode v celoti odstranjen s pomočjo rastlin (SHARDENDU et al. 2003). Mikroalga *Chlorella* sp. Se je izkazala kot izjemno učinkovita pri akumulaciji in pretvorbi dodanega selenata v hlapni dimetilselenid. Kar 90 % 20mM selenata je bilo iz vode odstranjenega na ta način. (NEUMANN et al. 2003). Vsebnost selena v različnih makrofitih so preučevali tudi na več lokacijah v Sloveniji. Ugotavljali so, ali je prisotna povečana vsebnost Se v makrofitih in kako se ta spreminja glede na mesto vzorčenja. V ta namen so vzorčili na desetih merilnih mestih v Notranjski in osrednji Sloveniji, z različno rabo tal. Ugotovili so, da je bila koncentracija selena v vodah na vseh vzorčnih lokacijah nižja kot 1 µg Se/ L. Vsebnost selena v makrofitih pa se je spreminjala glede na mesto vzorčenja, in sicer je bila vsebnost selena najvišja v vzorcih iz vodotoka Žerovniščica (0,04 do 0,41 µg Se/L izmerjenega v vodi), to je lahko posledica kmetijstva v zaledju Žerovnišnice. Najmanj selena so zaznali v vzor-

cih makrofitov in vode, vzetih iz vodotoka Lipenjščica. Slednje je bilo pričakovano, saj v okolici ni veliko kmetijske dejavnosti in vasi. Ugotovili so tudi, da so največ selena v vodi izmerili v mesecu juliju, kar je lahko posledica gnojenja v okolici vodotokov. Več selena so v vodi zaznali tudi v mesecu oktobru, kar je prav tako lahko posledica odtekanja gnojil. Največ selena so izmerili v mahovih, ki so znani akumulatorji (3038 µg Se/g SM) in v amfibijski vrsti vodni jetičnik (*Veronica anagallis-aquatica*) (1507 µg Se/g). Kljub temu, da je bila izmerjena vsebnost selena v vodi nizka, je bila izmerjena vsebnost selena v vzorcih makrofitov visoka. Makrofiti so tako bolj primerni za monitoring obremenjenosti okolja s selenom, zlasti na kmetijskih območjih (MECHORA et al. 2014). Povečana vsebnost selena v vodnih rastlinah je lahko toksična tudi za živali, ki se hranijo z vodnimi rastlinami. V jezerskem sedimentu, ki je bil onesnažen s selenom, so bile izmerjene povečane vsebnosti selena v bakterijah in prav tako v vodnih rastlinah. Posledično je prihajalo do zastrupitev ptic, ki so se krmile s temi rastlinami (BRADLEY 2017).

4 SELEN V KOPENSKIH RASTLINAH

Selen je po kemijski zgradbi podoben žveplu in tudi privzem selena v rastline poteka preko transporterjev za žveplo, ki se nahajajo v membrani koreninskih celic (FINLEY 2005; Gupta & GUPTA 2017). Rastline privzemajo selen iz tal prvenstveno v obliki selenata, ki se prenese v kloroplaste, njegova asimilacija v rastlini se nato nadaljuje po enaki poti kot asimilacija žvepla. Selenat se po tej poti z redukcijo nato pretvori v selenit, kasneje pa tudi v selenove-aminokislino, kot sta selenometionin in selenocistein (FINLEY 2005). Preučevana je bila vsebnost različnih kemijskih oblik selenovih spojin v izvlečku rastline puščavskih območij, ki je znana tudi kot hiperakumulator selena *Stanleya pinnata*. Ugotovili so, da je bilo v izvlečku rastline *Stanleya pinnata* 73 do 85,5 % selena vezanega z aminokisljinami, selenata je bilo med 7,5 in 19,5% ne - aminokislinsko vezanega organskega selena je bilo manj kot 7 %, vsebnost selenita pa je bila pod mejo detekcije. Študija je pokazala, da se je večina selenata med procesom rasti rastlin metabolno pretvorila v selenove aminokislino (ZHANG & FRANKENBERGER 2001).

Selen ima v rastlinah pozitiven učinek na rast rastlin in dozorevanje semen (HARTIKAINEN et al. 2000; XUE et al. 2001). Prav tako lahko selen zaščiti rastline pred abiotskim stresom, vključno z ultravijoličnim sevanjem, mrazom, sušo in privzemom težkih kovin iz

tal in biotskim stresom, kot so patogeni in herbivori (GUPTA & GUPTA 2017; SCHIAVON et al. 2017). Preučevali so, kako dodani selen vpliva na strpnost kumar (*Cucumis sativus* L.) na kadmij. Rastline kumar so rasle v hranilni raztopini, ki so ji dodali kadmij (0, 25 ali 0,50 M) in selen (0,5 ali 10 M). Rastline, ki so bile izpostavljene kadmiju in so jim dodali selen, so imele znatno manjšo peroksidacijo lipidov, prav tako pa se je zmanjšala tudi vsebnost kadmija v koreninah teh rastlin (HAWRYLAK NOWAK et al. 2014).

Ugotovljeno je bilo, da suša močno vpliva na pridelke koruze, saj ima močan negativen vpliv na cvetenje koruze (NELSON et al. 2007). Ugotovljeno je bilo, da selen pri koruzi poveča strpnost na stres, ki ga povzroča suša. Kljub temu pa pri vseh rastlinah ni bilo ugotovljeno, da selen pozitivno vpliva na razvoj cvetov pri koruzi, ki je rasla v sušnih razmerah. Zaznali so celo negativne učinke selena na oprašitev koruze, ki je rasla v razmerah z dovolj vode v tleh. Glede na dobljene rezultate so zaključili, da bi bila v namen povečanja strpnosti na stres, ki ga povzroča suša primerna količina dodanega selena v tla za rastline koruze okoli 0,01 mg/kg v obliki natrijevega selenata (SHEN et al. 2008). V povečanih koncentracijah selen deluje kot pro-oksidant in zavira rast rastlin in dozorevanje semen ter zmanjšuje pridelke (HARTIKAINEN et al. 2000; XUE et

al. 2001). Selen lahko vpliva na kakovost sadja in zelenjave. Obravnavanje rastlin brokolija s selenom je imelo pozitiven učinek na ohranjanje senzoričnih lastnosti in kakovosti brokolija, saj je vplival na zmanjšanje respiratorne učinkovitosti in proizvodnjo etilena v brokoliju in tako upočasnil zorenje brokolija in mu na ta način podaljšal obstojnost (LV et al. 2017). Selen je pri zelenem čaju vplival na povečanje pridelka, skupne vsebnosti aminokislin in vsebnost C vitamina (HU et al. 2003). Pršenje krošenj dreves s selenom je pri breskvah in hruškah upočasnilo mehčanje plodov in tako podaljšalo življenjsko dobo plodov (PEZZAROSSA et al. 2012). Tretiranje s selenom se je izkazalo kot učinkovito pri zmanjšanju pojava sive plesni na paradižniku, ki ga povzroča plesen *Botrytis cinerea* (WU et al. 2016). Antioksidativni učinek selena je bil ugotovljen v zelenjavi in žitih s povečano vsebnostjo selena in je imel učinek na zmanjšanje proizvodnje rastlinskega hormona etilena, ki je odgovoren za senescenco in zorenje plodov. To nakazuje, da bi selen lahko prispeval k podaljšanju skladiščne sposobnosti kmetijskih rastlin (PUCCINELLI et al. 2017; GERM et al. 2007). V Libanonu so preučevali vsebnost selena v tleh in lokalno pridelanih žitih in zelenjadnicah. Vsebnost selena so določali v 66 vzorcih tal in 13 vzorcih različnih rastlinskih vrst. Ugotovili so, da je vsebnost topnega selena v tleh med 47 in 142 $\mu\text{g/kg}$, selen v obliki selenita in selenata med 147 in 400 $\mu\text{g/kg}$ in selena, vezanega v aminokislino, med 1749 in 4713 $\mu\text{g/kg}$. Povprečne koncentracije selena v rastlinah so se gibale po naslednjem padajočem vrstnem redu: radič > solata > kumara > zelje > peteršilj > lucerne > listi čebule > brokoli > paradižnik > meta > čičerika > pšenica > čebula (WAKIM et al. 2010). Preučevan je bil tudi vpliv arbuskularne mikorize na bio-dostopnost selena iz rizosfere za štiri različne vrste rastlin, koruzo, solato, radič in ljulko. Poskus so izvedli v loncih, v katere so posadili omenjene rastline. Ocenjevali so biomaso rastlin in koncentracijo selena v poganjkih in koreninah rastlin okuženih z mikorizno glivo *Glomus mosseae* in kontrolnih rastlin. Ugotovljeno je bilo, da se biomasa rastlin in privzem selena iz rizosfere spreminjata glede na rastlinsko vrsto. Največjo biomaso in največji privzem selena so ugotovili pri radiču, najmanjšo biomaso in privzem selena iz rizosfere pa so določili pri ljulki. Ugotovljeno je bilo tudi, da mikoriza ni imela značilnega vpliva na rast rastlin, je pa v povprečju zmanjšala privzem selena iz tal v rastline za 30 % (MUNIER LAMY et al., 2007). Ugotavljali so, kako se selen bioakumulira v rastline riža, predvsem zrnje, ki se uporablja za prehrano ljudi. Ugotovili so, da je povezava med skupno vsebnostjo selena v tleh in skupno vsebnostjo selena v zrnju riža šibka. Ugotovili so, da višji pH tal olajša privzem selena v rastline riža.

Selen se je v rastline riža tako bolje akumuliral v alkalnih tleh, kot v kislih. V nevtralnih do kislih tleh je selen navadno prisoten v obliki selenita, ki je slabo topen in tudi slabše dostopen rastlinam. V nevtralnih do alkalnih tleh je selenit oksidiran v selenat, ki je bolj topen in rastlinam tako lažje dostopen. Tudi delež organske snovi v tleh ni imel vpliva na povečanje privzema selena v zrnje riža. Ugotovili so, da skupna vsebnost selena v zrnju riža ni neposredno povezana s skupno vsebnostjo selena v tleh, vsebnostjo organske snovi v tleh in pH tal (ZHANG et al. 2014a). Preučevali so tudi, kako dodatek selena v tla vpliva na količino pridelka in fotosintezo pri rižu. Poskus so izvedli na polju. Rastlinam so dodajali različne količine selena v razponu od 0 do 100 g Se/ha. Ugotovili so, da se je pridelek riža povečal v primeru, ko so rastlinam dodajali 50 g Se/ha. Selen je povečal tudi tvorbo korenin pri rižu. Selen je bil prav tako izmerjen v zelenih delih vse od faze razraščanja do zrele faze rasti rastlin. Imel pa je tudi ugodne učinke na povečanje fotosinteze in posledično pridelka riža (ZHANG et al. 2014b). V naslednji raziskavi so preučevali sposobnost dveh vrst rastlin iz družine križnic (*Brassicaceae*) za fitoremediacijo s selenom kontaminiranih tal. Akumulatorja selena, vrsti *Brassica juncea* in *Stanleya pinnata*, sta bili izpostavljeni dodatku različne koncentracije selenata: 0 μM selenata (kontrolna skupina), 8 μM in 13 μM . Širina cvetov, cvetni listi in dolžina semen, so bili statistično značilno manjši pri rastlini *Brassica juncea* ob dodatku 13 μM selenata v primerjavi s kontrolno skupino, ki ji selenat ni bil dodan. Pri cvetovih in semenih vrste *S. pinnata* niso zaznali učinka selenata. Študija je pokazala, kako različne količine selenata vplivajo na vsebnost selena v cvetovih in semenih dveh vrst rastlin. V naravnih razmerah na vsebnost selena v rastlinah vplivajo še drugi okoljski dejavniki, kot je trajanje izpostavljenosti rastlin selenu, vsebnost selena v vodi in tleh. Visoke vsebnosti selena v cvetnem prahu in nektarju pa lahko predstavljajo tudi nevarnost za žuželke, ki se pasejo na takih rastlinah (HLADUNA et al. 2011).

V poskusu so preučevali, kako se selen pretvarja v kalihah tatarske ajde (*Fagopyrum tataricum*), katerih semena so namakali v različne raztopine selena. Semena so namakali v raztopino Se-metionina (10 mg Se/L) in selenata ali selenita (5, 10, 20 mg Se/L). Ugotovili so, da je bil privzem selena v kalice tatarske ajde odvisen od kemijske oblike in koncentracije selena v raztopini, v kateri so namakali semena tatarske ajde. V supernatantih izvlečkov vseh kalih tatarske ajde, katerih semena so bila namakana v raztopino z dodatkom selena, so izmerili 23,7 do 29,7 % selenata, 2,4 do 7,9 % Se-metionina, in selenita v sledovih, ne glede na koncentracijo in kemijsko obliko selena v raztopini za namakanje

semen tatarske ajde (CUDERMAN et al. 2010). Ugotavljali so tudi, kako selen vpliva na dihalni potencial mladih rastlin tatarske ajde. Rastline so na začetku cvetenja foliarno pognojili s 10 mg Se/L v obliki selenata (Se(VI)). Selen je uspešno prehajal v rastlino in v semena tatarske ajde, v katerih je bila njegova koncentracija 2-krat višja, kot v semenih neobravnavanih rastlin. Semena s selenom obravnavanih rastlin so nato zbrali in jih posejali z namenom, da bi iz njih zrastle nove rastline tatarske ajde. Da bi ugotavljali fiziološke značilnosti rastlin, obravnavanih s selenom in kontrolnih rastlin (brez tretiranja s selenom), so ocenjevali respiratorni

potencial in fotokemično učinkovitost fotosistema II. Tri tedne po kalitvi so pri rastlinah tatarske ajde iz semen, ki so vsebovala več selena, ugotovili večji respiratorni potencial v primerjavi s kontrolnimi rastlinami. Po 4 do 5 tednih se je respiratorna aktivnost v rastlinah tatarske ajde prepolovila in razlika, ki je bila opazna po treh tednih med obravnavanimi in kontrolnimi rastlinami, ni bila več zaznana. Je pa bila po 4 tednih ugotovljena večja učinkovitost fotosistema II pri rastlinah, tretiranih s selenom. Ugotovljeno je bilo tudi, da se je pri rastlinah tatarske ajde, obravnavanih s selenom, povečala suha masa listov (KREFT et al., 2013).

ZAKLJUČEK

Selen je v tleh prisoten kot posledica naravnih in antropogenih dejavnikov. V vodnih ekosistemih je vsebnost selena povečana predvsem kot posledica onesnaževanja. Rastline so iz okolja sposobne privzemati različne količine selena. Selen je rastlinam od anorganskih oblik najbolj dostopen v obliki selenata in selenita in se v rastlinah pretvori v organsko obliko in hlapne snovi. Sposobnost tako vodnih kot kopenskih rastlin za privzem selena iz okolja lahko izkoristimo za bioindikacijo in fitoremediacijo s selenom onesnaženih tal ali vodnega okolja. Ugotovljeno je bilo, da lahko selen prispeva k izboljšanju procesa fotosinteze, povečanju respiratornega potenciala in zmanjšanje oziroma povečanje vsebnosti klorofila v vodnih rastlinah. V kopenskih rastlinah so zaznali pozitiven vpliv selena na rast rastlin in dozorevanje semen, po-

večanje mase korenin in povečanje suhe mase listov. Vpliva lahko tudi na povečanje respiratornega potenciala rastlin in izboljša fotosintezo. Zaznan je bil tudi pozitiven učinek na daljšo obstojnost plodov sadja in zelenjave, saj selen v rastlinah vpliva na zmanjšanje nastajanja rastlinskega hormona etilena, ki je odgovoren za staranje in hitrejše zorenje plodov. Selen ima ob povečanih koncentracijah za rastline lahko tudi negativen učinek, saj deluje kot pro-oksidant in lahko zavira rast rastlin, dozorevanje semen in zmanjša pridelke kmetijskih rastlin. Povečane koncentracije selena v rastlinah lahko ogrožajo tudi zdravje živali in ljudi, ki se s temi rastlinami hranijo. Poznavanje privzema in akumulacije selena v rastline je ključno za nadaljnje preučevanje in razumevanje kroženja selena v naravi.

SUMMARY

Selenium occurs in the soil as a result of depositing rock sediments (WHITE et al., 2004), and often also as a result of human activities (WINKEL et al., 2012). The concentration of selenium in soil depends on soil type, organic matter in soil and precipitation (SORS et al., 2005). Selenium is present in a variety of chemical forms in aqueous environments, inorganic as selenate, selenite in organic form as selenium-amino acids such as selenomethionine and selenocysteine (BRADLEY 2017). Selenium in the aquatic environment is most commonly a result of anthropogenic factors (MAIER & KNIGHT 1994). The accumulation and metabolism of selenium in plants takes place along the sulfur metabolic pathway and usually ends with the conversion of selenium into the volatile substance and its evapora-

tion from the plant (FINLEY 2005; GUPTA & GUPTA 2017). The ability of different types of plants to absorb selenium from the soil is also different. It is mainly influenced by the concentration of selenium in the soil, soil properties and the chemical form of selenium (ZHU et al., 2009; BANUELOS et al., 1990). It has been found that the higher pH of the soil facilitates the uptake of selenium from the soil (ZHANG et al., 2014a).

Aquatic plants can be used as effective bioindicators of pollution of water sources with selenium and as fitoremediators with selenium contaminated water sources. It has been found namely that the aquatic plants uptake selenium efficiently, from the aqueous environment in which the overload of selenium is detected (WU & GUO 2002 SHARDENDU et al. 2003; NEU-

MANN et al. 2003; MECHORA et al. 2014; BRADLEY 2017). A higher concentration of selenium in water resources may reduce the photochemical efficiency of photosystem II, respiratory potential, and may affect the increase or decrease in the content of chlorophyll in aquatic plants (MECHORA et al., 2013).

Despite the fact that essentiality of selenium for terrestrial plants is not yet fully established (CARTES et al. 2010; HASANUZZAMAN & FUJITA, 2011; GERM et al. 2007), it has been found that the presence of selenium in plants has a positive effect on plant growth and ripening seeds (HARTIKAINEN et al. 2000; XUE et al., 2001). Selenium can increase root weight (ZHANG et al. 2014b) and dry leaf mass, and increase the respiratory potential of crops and improve the effectiveness of photosystem II (KREFT et al., 2013). Selenium can also affect the quality of fruits of agricultural plants. Adding selenium into agricultural plants has a positive impact on the preservation of sensory properties and quality of harvested fruit. Selenium can also increase yield, increasing the total content of amino acids and vitamin C in agricultural plants. Selenium can also slow down softening of ripe fruits. With its antioxidant action selenium can reduce the production of ethylene in plants and thus slows down the se-

nescence and prolongs the life of the fruits (Lv et al., 2017; HU et al., 2003; PEZZAROSSA et al., 2012; PUCCINELLI et al., 2017). For selenium was found to be able to protect the plants against abiotic stress such as cold, drought and an increased content of heavy metals in the soil and biotic stress such as pathogens and herbivores (GUPTA & GUPTA 2017; SCHIAVON et al., 2017; WU et al., 2016). It should be noted also that the increased concentrations of selenium may also have a negative effect on plants, acting as a pro-oxidant; it can inhibit plant growth and maturation of seeds and reduces the yields of agricultural crops (HARTIKAINEN et al., 2000; XUE et al. 2001). Increased selenium concentrations in plants can also endanger the health of animals and people consuming these plants (BRADLEY 2017; PUCCINELLI et al. 2017). Terrestrial plants that can take up large amounts of selenium from the soil are also useful for the phytoremediation of soil contaminated with selenium (HLADUNA et al., 2011). Knowing the differences in uptake and accumulation of selenium in both water and terrestrial plants is the key to understanding the movement of selenium in the environment and the importance of plants to reduce selenium content in environments contaminated with selenium.

ZAHVALA

Raziskovalni program (št. P1-0212 »Biologija rastlin«) je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the research core funding (No. P1-0212 »Biology of Plants«), which was financially supported by the Slovenian Research Agency.

LITERATURA-REFERENCES:

- BAILEY, F.C., KNIGHT, A.W., OGLE, R. S. & S.J. KLAINE, 1995: *Effect of sulfate level on selenium uptake by Ruppia maritima*. Chemosphere (Netherlands) 30: 579–591. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)00419-U](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)00419-U)
- BAJAJ, M., EICHE, E., NEUMANN, T., WINTER, J. & C. GALLERT, 2011: *Hazardous concentrations of selenium in soil and groundwater in North-West India*. Journal of Hazardous Materials (Netherlands) 189: 640–646. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.086>
- BANUELOS, G.S. & D. W. Meek, 1990: *Accumulation of selenium in plants grown on selenium-treated soil*. Journal of Environmental Quality (United States of America) 19: 772. <https://doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900040023x>
- BORNETTE, G. & S. Puijalon, 2009: *Macrophytes: Ecology of aquatic plants*. Encyclopedia of Life Sciences (England) 1–9 str.

- BRADLEY, T., 2017: *Selenium management in the habitat marshes adjacent to the Salton sea*. Department of Ecology and Evolutionary Biology University of California, Irvine, California (United States of America) 1–3.
- CARTES, P., JARA, A. A., PINILLA, L., ROSAS, A. & M. L. MORA, 2010: *Selenium improves the antioxidant ability against aluminium-induced oxidative stress in ryegrass roots*. Annals of Applied Biology (England) 56: 297–307. <https://DOI: 10.1111/j.1744-7348.2010.00387.x>
- COOK, C. D. K., 1999: *The number and kinds of embryo-bearing plants which have become aquatic*. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics (Germany) 2: 79–102. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00066>
- CUDERMAN, P., OŽBOLT, L., KREFT, I. & V. STIBILJ, 2010: *Extraction of Se species in buckwheat sprouts grown from seeds soaked in various Se solutions*. Food Chemistry (England) 123: 941–948. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.063>
- ELLIS, D. R. & D. E. SALT, 2003: *Plants, selenium and human health*. Current Opinion in Plant Biology (England) 6: 273–279. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00030-X)
- FINLEY, J. W., 2005: *Selenium accumulation in plant foods*. Nutrition Reviews (England) 3: 196–202. <https://DOI: 10.1111/j.1753-4887.2005.tb00137.x>
- FORDYCE F., 2005: *Selenium deficiency and toxicity in the environment*. British geological survey (England), chapter 15: 373–415.
- GERM, M., STIBILJ, V. & I. KREFT, 2007: *Metabolic Importance of selenium for plants*. The European Journal of Plant Science and Biotechnology (England) 1: 91–97.
- GERM, M., 2009: *Makrofiti ali vodne rastline*. Svet ptic (Slovenia) 3: 20–21
- GERM, M., 2013: *Biologija vodnih rastlin*. Učbenik, Samozaložba (Slovenia) 72 p.
- GOLOB, A., 2017: *Vpliv UV sevanja na vsebnost selena in silicija pri križancu tatarske ajde (Fagopyrum tataricum Gaertn.) in orjaške ajde (F. giganteum Krotov) ter pri pšenici (Triticum aestivum L.)*. Doktorska disertacija, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana (Slovenia) 119 p.
- GORE, F., FAWELL, J. & J. BARTRAM, 2010: *Too much or too little? A review of conundrum of selenium*. Journal of Water and Health (England) 8: 405–416. <https://doi:10.2166/wh.2009.060>
- GUPTA, M. & S. GUPTA, 2017: *An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants*. Frontiers in Plant Science (Switzerland) <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
- HARTIKAINEN, H., 2005: *Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health*. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology (Germany) 18: 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.009>
- HARTIKAINEN, H., XUE, T. & V. PIIRONEN, 2000: *Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass*. Plant Soil (Netherlands) 225: 193–200.
- HASANUZZAMAN, M. & M. FUJITA, 2011: *Selenium pretreatment upregulates the antioxidant defense and methylglyoxal detoxification system and confers enhanced tolerance to drought stress in rapeseed seedlings*. Biological Trace Element Research (United States of America) 143: 1758–1776. <https://doi: 10.1007/s12011-011-8998-9>
- HAWRYLAK NOWAK, B., DRESLER, S. & M. WOJCIK, 2014: *Selenium affects physiological parameters and phytochemical accumulation in cucumber (Cucumis sativus L.) plants grown under cadmium exposure*. Scientia Horticulturae (Netherlands) 172: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.040>
- HLADUNA, K. R., PARKER, D. R. & J. T. TRUMBLEA, 2011: *Selenium accumulation in the floral tissues of two Brassicaceae species and its impact on floral traits and plant performance*. Environmental and Experimental Botany (England) 74: 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.05.003>
- HU, Q., XU, J. & G. PANG, 2003: *Effect of selenium on the yield and quality of green tea leaves harvested in early spring*. Journal of Agricultural and Food Chemistry (United States of America) 51: 3379–3381. <https://DOI: 10.1021/jf0341417>
- KAČ, M., 2001: *Leksikon kemije*. Mladinska knjiga, Ljubljana (Slovenia) 245 p.
- KREFT, I., MECHORA, Š., GERM, M. & V. STIBILJ, 2013: *Impact of selenium on mitochondrial activity in young Tarrary buckwheat plants*. Plant Physiology and Biochemistry (France) 63: 196–199. <https://DOI: 10.1016/j.pla-phy.2012.11.027>
- LEMLEY, A. D., 2004: *Aquatic selenium pollution is a global environmental safety issue*. Ecotoxicology and Environmental Safety (Netherlands) 59: 44–56. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00095-2)
- LV, J., WU, J., ZUO, J., FAN, L., SHI, J., GAO, L., LI, M. & Q. WANG, 2017: *Effect of Se treatment on the volatile compounds in broccoli*. Food Chemistry (England) 216: 225–233. <https://doi: 10.1016/j.foodchem.2016.08.005>
- MAIERALLEN, K. J. & W. KNIGHT, 1994: *Ecotoxicology of selenium in freshwater systems*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (United States of America) 134: 31–48.

- MECHORA, S., GERM, M. & V. STIBILJ, 2014: *Monitoring of selenium in macrophytes–The case of Slovenia*. Chemosphere (England) 111: 464–470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.133>
- MECHORA, S., STIBILJ, V. & M. GERM, 2013: *The uptake and distribution of selenium in three aquatic plants grown in Se(IV) solution*. Aquatic Toxicology (Netherlands) 128–129: 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.11.021>
- MEHDI, Y., HORNICK, J. L., ISTASSE, L. & I. DUFRASNE, 2013: *Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions*. Molecules (Switzerland) 18: 3292–3311. <https://doi.org/10.3390/molecules18033292>
- MUNIER LAMY, C., DENEUX MUSTIN, S., MUSTIN, C., MERLET, D., BERTHELIN, J. & C. LEYVAL, 2007: *Selenium bioavailability and uptake as affected by four different plants in a loamy clay soil with particular attention to mycorrhizae inoculated ryegrass*. Journal of Environmental Radioactivity (England) 9: 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.04.001>
- NEUMANN, P. M., DE SOUZA, M. P., PICKERING, I. J. & N. TERRY, 2003: *Rapid microalgal metabolism of selenate to volatile dimethylselenide*. Plant, Cell and Environment (United States of America) 26: 897–905. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01022.x>
- NELSON, D. E., REPETTI, P. P., ADAMS, T. R., CREELMAN, R. A., WU, J., WARNER, D. C., ANSTROM, D. C., BENSON, R. J., CASTIGLIONI, P. P., DONNARUMMO, M. G., HINCHEY, B. S., KUMIMOTO, R. W., MASZLE, D. R., CANALES, R. D., KROLIKOWSKI, K. A., DOTSON, S. B., GUTTERSON, N., RATCLIFFE, O. J. & J. E. HEARD, 2007: *Plant nuclear factor Y (NF-Y) B subunits confer drought tolerance and lead to improved corn yields on water-limited acres*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (United States of America) 104: 16450–16455. <https://doi.org/10.1073/pnas.0707193104>
- PEZZAROSSA, B., REMORINI, D., GENTILE, M. L. & R. MASSAI, 2012: *Effects of foliar and fruit addition of sodium selenate on selenium accumulation and fruit quality*. Journal of the Science of Food and Agriculture (England) 92: 781–786. DOI: 10.1002/jsfa.4644
- PIRC, S. & R. ŠAJN, 1997: *Vloga geokemije v ugotavljanju kemične obremenitve okolja. V: Projekt evropskega leta varstva narave 1995. Kemizacija okolja in življenje. Do katere meje?*. Slovensko ekološko društvo, Ljubljana (Slovenia) 165–185.
- SCHIAVON, M., ERTANI, A., PARRASIA, S. & F. D. VECCHIA, 2017: *Selenium accumulation and metabolism in algae*. Aquatic Toxicology (Netherlands) 189: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.05.011>
- SCHIAVON, M. & E. A. H. PILON-SMITS, 2017: *Selenium biofortification and phytoremediation phytotechnologies. A review*. Journal of Environmental Quality (United States of America) 46: 10–19. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.09.0342>
- SHARDENDU, S., SALHANI, N., BOULYGA, S. F. & E. STENGEL, 2003: *Phytoremediation of selenium by two helophyte species in subsurface flow constructed wetland*. Chemosphere (Netherlands) 50: 967–973. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00607-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00607-0)
- SHEN, Q. Y., TURAKAINEN, M., SEPPANEN, M. & P. MAKELA, 2008: *Effects of selenium on maize ovary development at pollination stage under water deficits*. Agricultural Sciences in China (China) 7: 1298–1307. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60178-9](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60178-9)
- SIGRIST, M., BRUSA, L., CAMPAGNOLI, D. & H. BELDOMENICO, 2012: *Determination of selenium in selected food samples from Argentina and estimation of their contribution to the Se dietary intake*. Food Chemistry (England) 134: 1932–1937. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.116>
- SORS, T. G., ELLIS, D. R., NA, G. N., LAHNER, B., LEE, S., LEUSTEK, T., PICKERING I. J. & D. E. SALT, 2005: *Analysis of sulfur and selenium assimilation in Astragalus plants with varying capacities to accumulate selenium*. The Plant Journal (England) 42: 785–797. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2005.02413.x>
- TANG, Y., HARPENSLAGER, S. F., VAN KEMPEN, M. L., VERBAARSCHOT, E. J. H., LOEFFEN, L. M. J. M., ROELOFS, J. G. M., SMOLDERS, A. J. P. & L. P. M. LAMERS, 2017: *Aquatic macrophytes can be used for wastewater polishing but not for purification in constructed wetlands*. Biogeosciences (Germany) 14: 755–766. <https://doi.org/10.5194/bg-14-755-2017>
- XUE, T., HARTIKAINEN, H. & V. PIIRONEN, 2001: *Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce*. Plant Soil (Netherlands) 237: 55–61.
- WAKIM, R., BASHOUR, I., NIMAH, M., SIDAHMED, M. & I. TOUFEILI, 2010: *Selenium levels in Lebanese environment*. Journal of Geochemical Exploration (Netherlands) 107: 94–99. <https://doi.org/10.1023/A:1013369804867>
- WHITE, P. J., BOWEN, H. C., PARMAGURU, P., FRITZ, M., SPRACKLEN, W. P., SPIBY, R. E., MEACHAM, M. C., MEAD, A., HARRIMAN, M., TRUEMAN, L. J., SMITH, B. M., THOMAS, B. & M. R. BROADLEY, 2004: *Interactions between*

- selenium and sulphur nutrition in Arabidopsis thaliana*. Journal of Experimental Botany (England) 55: 1927–1937. [https://DOI: 10.1093/jxb/erh192](https://doi.org/10.1093/jxb/erh192)
- WINKEL, L. H., JOHNSON, C. A., LENZ, M., GRUNDL, T., LEUPIN, O. X., AMINI, M. & L. CHARLET, 2012: *Environmental selenium research: From microscopic processes to global understanding*. Environmental Science & Technology (United States of America) 46: 571–579. [https://DOI: 10.1093/jxb/erh192](https://doi.org/10.1093/jxb/erh192)
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2011: *Selenium in drinking-water*. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality (WHO/HSE/WSH/10.01/14) (United States of America) 1–14.
- WU, Z., YIN, X., BANUELOS, G. S., LIN, Z. Q., LIU, Y., LI, M. & L. YUAN, 2016: *Indications of selenium protection against cadmium and lead toxicity in oilseed rape (Brassica napus L.)*. Frontiers in Plant Science (Switzerland) 7: 1875. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01875>
- WU, Z., YIN, X., BANUELOS, G.S., LIN, Z.Q., ZHU, Z., LIU, Y., YUAN, L. & M. LI, 2016. *Effect of selenium on control of postharvest gray mold of tomato fruit and the possible mechanisms involved*. Frontiers in Microbiology (Switzerland) 6: 1–11. [https://doi: 10.3389/fmicb.2015.01441](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01441)
- WU, L. & X. GUO, 2002: *Selenium accumulation in submerged aquatic macrophytes Potamogeton pectinatus L. and Ruppia maritima L. from water with elevated chloride and sulfate salinity*. Ecotoxicology and Environmental Safety (Netherlands) 51: 22–27. <https://doi.org/10.1006/eesa.2001.2116>
- ZHANG, Y. & JR. W. T. FRANKENBERGER, 2001: *Speciation of selenium in plant water extracts by ion exchange chromatography-hydride generation atomic absorption spectrometry*. The Science of the Total Environment (Netherlands) 269: 39–47. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00809-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00809-3)
- ZHANG, H., FENG, X., JIANG, C., LI, Q., GU, C., SHANG, L., LI, P., LIN, Y. & T. LARSEN, 2014a: *Understanding the paradox of selenium contamination in mercury mining areas: High soil content and low accumulation in rice*. Environmental Pollution (England) 188: 27–36. [https://doi: 10.1016/j.envpol.2014.01.012](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.01.012)
- ZHANG, M., TANG, S., HUANG, X., ZHANG, F., PANG, Y., HUANG, Q. & Q. YI, 2014b: *Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (Oryza sativa L.)*. Environmental and Experimental Botany (England) 107: 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.05.005>
- ZHU, Y.G., PILON-SMITS, E. A. H., ZHAO, F.J., WILLIAMS, P.N. & A. A. MEHARG, 2009: *Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation*. Trends in Plant Science (England) 14: 436–442. [https://doi: 10.1016/j.tplants.2009.06.006](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.06.006)