

KATARZYNA GŁOWACKA<sup>1</sup>, MAŁGORZATA SZULTKA-MŁYŃSKA<sup>2</sup>, MATEUSZ CICHOREK<sup>1</sup>,  
ALEKSANDRA ORZOŁ<sup>2</sup>, AGNIESZKA ROGOWSKA<sup>3</sup>, EDITH CRUZADO-TAFUR<sup>1</sup>, PAWEŁ  
POMASTOWSKI<sup>3</sup>, RYSZARD GÓRECKI<sup>1</sup>, BOGUSŁAW BUSZEWSKI<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Katedra Fizjologii, Genetyki i Biotechnologii Roślin  
Wydział Biologii i Biotechnologii  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Oczapowskiego 1a, 10-719 Olsztyn

<sup>2</sup>Katedra Chemii Środowiska i Bioanalitiky  
Wydział Chemii

Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
Gagarina 7, 87-100 Toruń

<sup>3</sup>Interdyscyplinarne Centrum Nowoczesnych Technologii  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
Wileńska 4, 87-100 Toruń

E-mail: [katarzyna.glowacka@uwm.edu.pl](mailto:katarzyna.glowacka@uwm.edu.pl)

[mszultka@umk.pl](mailto:mszultka@umk.pl)

[mateusz.cichorek@uwm.edu.pl](mailto:mateusz.cichorek@uwm.edu.pl)

[ola.orzol@umk.pl](mailto:ola.orzol@umk.pl)

[aga4356@wp.pl](mailto:aga4356@wp.pl)

[edith.cruzado@uwm.edu.pl](mailto:edith.cruzado@uwm.edu.pl)

[p.pomastowski@umk.pl](mailto:p.pomastowski@umk.pl)

[rigor@uwm.edu.pl](mailto:rigor@uwm.edu.pl)

[bbusz@chem.umk.pl](mailto:bbusz@chem.umk.pl)

## ZNACZENIE KRZEMU DLA WYBRANYCH GATUNKÓW ROŚLIN

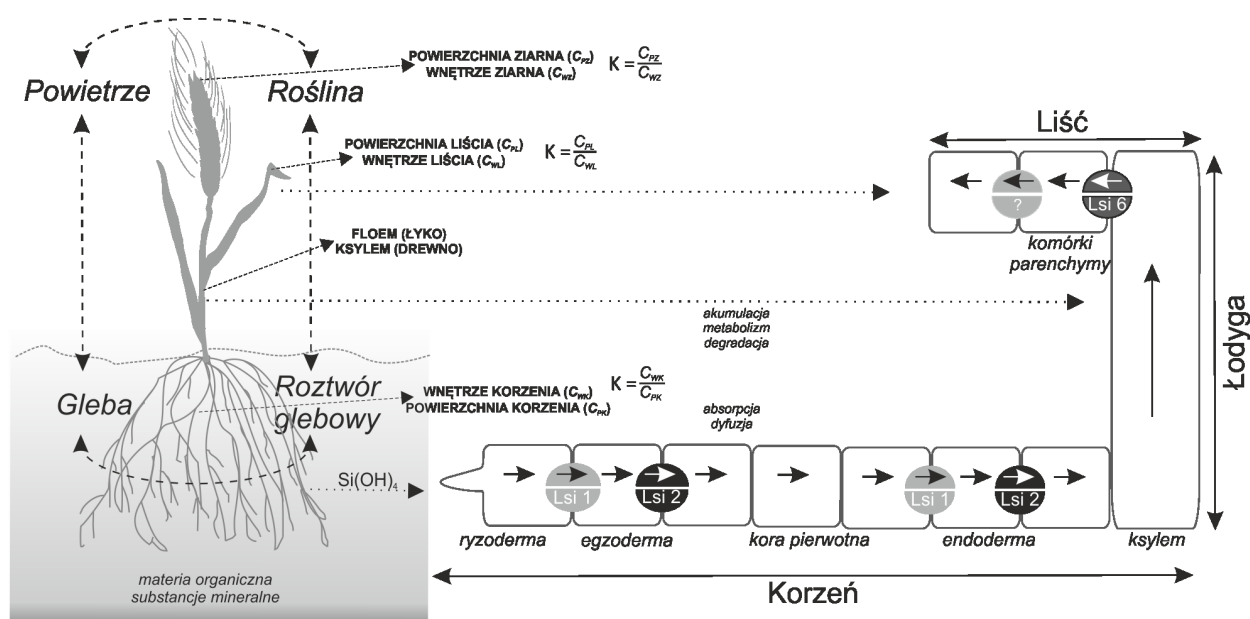
### WYSTĘPOWANIE I AKUMULACJA KRZEMU W ROŚLINACH

Krzem (Si) występuje głównie w glebie w postaci stałych form krystalicznych, takich jak kwarc i mika, minerały mikrokrystaliczne, lub jako wtórne minerały krzemianowe (CORNELIS i DELVAUX 2016, SOURIS i współaut. 2020). Krzem występujący w postaci krzemionki (SiO<sub>2</sub>) lub krzemianów, czyli form praktycznie nierozpuszczalnych w wodzie, jest niedostępny dla roślin. W glebach minerały krzemianowe ulegają wietrzeniu chemicznemu i fizycznemu, powodując uwolnienie Si do roztworu glebowego, który łączy się z innymi pierwiastkami tworząc minerały ilaste lub jest pobierany przez rośliny (GUNTZER i współaut. 2012). Natomiast w warunkach

wodnych mineralny Si rozpuszcza się tworząc kwasy ortokrzemowy i polikrzemowy (SAUER i współaut. 2006). Kwas ortokrzemowy po uwolnieniu do roztworu glebowego staje się niestabilny. Jego cząsteczki mają duże skłonności do polimeryzacji i bardzo łatwo przechodzą w formy nierozpuszczalne i niedostępne dla roślin. W związku z tym przyswajalna dla roślin ilość krzemu w glebach jest nieduża i, co ciekawe, rośliny rosnące w podłożu zawierającym duże ilości krzemu mogą doświadczać jego niedoboru (ZAJĄCZKOWSKA i KORZENIOWSKA 2020). Mimo dużej zawartości Si w glebie pobieranie tego pierwiastka jest utrudnione, ponieważ uwalnianie kwasu ortokrzemowego z krzemionki oraz krzemianów jest procesem nadzwyczaj powolnym i ograniczonym (LIANG i współaut.

**Słowa kluczowe:** groch, krzem, lucerna, pszenica, stresy biotyczne i abiotyczne

\*Praca została wykonana dzięki wsparciu finansowemu z grantu Opus 18 (2019/35/B/ST4/02791) (2020-2024) udzielonego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN), Kraków.

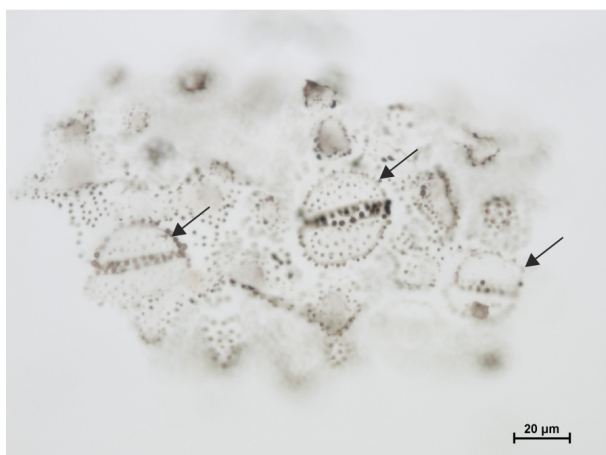


Ryc. 1. Schemat pobierania krzemu przez rośliny oraz lokalizacji jego transporterów w roślinie (wg MA i YAMAJI 2006, MA i współaut. 2006, 2007) (objaśnienia w tekście).

2015). Dominującą rozpuszczalną formą krzemu w roztworze glebowym jest kwas ortokrzemowy ( $H_4SiO_4$ ) i w tej formie jest on pobierany przez rośliny (Ryc. 1). W rzeczywistości jest on nienaładowaną cząsteczką monomeru  $H_4SiO_4^*$ , występującą tylko w określonym zakresie kwasowości (pH 2-9), natomiast gdy pH jest wyższe niż 9, wtedy występuje w postaci zjonizowanej  $H_3SiO_4^-$  i  $H_2SiO_4^{2-}$  (KNIGHT i KINRADE 2001). Dlatego większość gleb o pH poniżej 9 zawiera niezdysoncjowany kwas ortokrzemowy w stężeniach w zakresie 0,1-0,6 mM (EPSTEIN 1994).

Stężenie krzemu w roślinach potrafi być bardzo zróżnicowane. Zmienna ilość akumulowanego krzemu w różnych tkankach roślin wynika w głównej mierze z odmiennego systemu pobierania i transportu Si u różnych gatunków roślin (JARVIS 1987, EPSTEIN 1994). MA i TAKAHASHI (2002) przeprowadzili szeroko zakrojone badanie zawartości Si u prawie 500 gatunków roślin, od mszaków (Bryophyta) do okrytonasiennych (Magnoliophyta), uprawianych w podobnych warunkach glebowych. Uzyskane wyniki pokazały, że u roślin istnieje charakterystyczny rozkład akumulacji Si. W roślinach wyższych tylko gatunki z rodziny traw [Poaceae (R. Br.) Barnh.] i turzyc (Cyperaceae Juss.) wykazują wysoką akumulację Si, rośliny z rzędu dyniowców (Cucurbitales Dumort.), pokrzywoców (Urticales Dumort.) i rodziny komelinowatych (Commelinaceae R. Br.) – średnią, podczas gdy większość innych gatunków roślin – niską.

Szeroki zakres zawartości krzemu w tkankach roślin przypisywany jest różnicom w zdolności korzeni do jego pobierania (TAKAHASHI i współaut. 1990). Ryż jest w stanie akumulować Si do 10% suchej masy pędów, co często jest w zakresie podobnym lub wyższym niż poziomy podstawowych makroelementów (MA i TAKAHASHI 2002). Pobieranie krzemu przez korzenie obejmuje co najmniej dwa procesy: promieniowy transport Si z roztworu zewnętrznego/glebowego do komórek kory pierwotnej korzenia oraz transport Si z komórek kory pierwotnej do ksylemu, tzw. ładowanie ksylemu (Ryc. 1). Po pobraniu przez korzenie krzem jest transportowany do pędu przez ksylem dzięki procesowi transpiracji (MA i YAMAJI 2006), gdzie jest zagęszczany, a następnie przekształcany w bezpostaciową krzemionkę ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ). Amorficzna krzemionka odkłada się pod epidermą tworząc warstwy kutykula-krzemionka (MA i TAKAHASHI 2002). Krzemionka jest odkładana w postaci cienkiej warstwy (2,5  $\mu m$ ) w przestrzeni bezpośrednio pod cienką (1,0  $\mu m$ ) warstwą kutykuli (SANGSTER i HODSON 1992). Proces ten jest charakterystyczny dla roślin z rodziny Poaceae akumulujących Si (EPSTEIN 1999). Krzemionka może również powstawać wewnątrz poszczególnych komórek, w ścianach komórkowych czy też w przestworach międzykomórkowych tworząc tzw. fitolity (ciała krzemionkowe) (SANGSTER i współaut. 2001, CHANDLER-EZELL i współaut. 2006, MA i YAMAJI 2006). Proces powstawania fitolitów nie zachodzi przypadkowo. Ga-



Ryc. 2. Wysycenie krzemionką ściany komórkowe epidermy skrzyphu (widoczne aparaty szparkowe - strzałki). Zdjęcie przedstawia spoielony materiał roślinny (Fot. K. Głowacka).

tunki roślin różnią się wielkością i kształtem gromadzonych fitolitów (Ryc. 2). Tworzenie i wzrost tych struktur odbywa się pod kontrolą określonych białek (HARRISON 1996, PERRY i KEELING-TUCKER 2000). Inne badania wskazują na duże znaczenie związków krzemorganicznych w roślinach. Stwierdzono, że u wybranych roślin, zawierających 0,74-3,59% Si, ponad 50% całkowitego krzemu znajduje się we frakcji organicznej, w porównaniu z formami spolimeryzowanymi i rozpuszczalnymi. Wykazano, że Si tworzy frakcję organiczną z białkami, związkami fenolowymi (lignina, skondensowane polifenole), lipidami i polisacharydami (celuloza, substancje pektynowe) (KOLESNIKOV i GINS 2001).

#### POBIERANIE I TRANSPORT KRZEMU W ROŚLINACH

Różnicę w akumulacji Si przypisuje się zdolności korzeni do pobierania Si w postaci kwasu ortokrzemowego (TAKAHASHI i współaut. 1990). Zaproponowano trzy różne sposoby pobierania dla roślin o różnym

stopniu akumulacji Si: pobieranie aktywne, pasywne i tzw. wykluczające (ang. rejective uptake) (TAKAHASHI i współaut. 1990). Rośliny o sposobie aktywnym pobierają Si szybciej niż wodę, co powoduje zmniejszenie ilości krzemu w roztworze glebowym. Rośliny o trybie pasywnym pobierają krzem z szybkością zbliżoną do szybkości pobierania wody, zatem nie obserwuje się znaczących zmian w stężeniu Si w roztworze glebowym. Natomiast rośliny o sposobie tzw. wykluczającym wybiórczo nie pobierają Si, czego dowodem jest rosnące stężenie krzemu w roztworze glebowym. W zależności od ilości zgromadzonego Si w tkankach JONES i HANDRECK (1967) zaproponowali podział roślin na 3 grupy: akumulujące Si (głównie trawy wilgotnych siedlisk), średnio-akumulujące Si (głównie trawy suchych siedlisk) i nieakumulujące Si (głównie rośliny dwuliścienne). Podział ten uwzględniał wyłącznie procentową zawartość krzemu w suchej masie roślin. Bardziej aktualny podział roślin został zaproponowany przez MA i TAKAHASHI (2002). W przeciwieństwie do innych pierwiastków, Si występuje w prawie wszystkich glebach. Analizując rośliny gromadzące krzem stwierdzili, że gatunki bogate w Si akumulują mało wapnia i odwrotnie. W związku z tym zaproponowano nowy podział roślin na akumulujące i nieakumulujące, a pozostałe, które nie spełniają tych kryteriów są nazywane roślinami średnio-akumulującymi (Tabela 1).

#### TRANSPORTERY KRZEMU W ROŚLINACH

Pierwszą rośliną, u której scharakteryzowano transportery krzemu, był ryż *Oryza sativa* (MITANI i współaut. 2005), a wśród roślin dwuliściennych – dynia piżmowa *Cucurbita moschata* Duch. (MITANI i współaut. 2011). Wcześniejsze badania wskazywały, że rośliny ryżu mają specyficzny system pobierania i transportu Si (TAMAI i MA 2003), wymagająca białek transbłonowych (MAR-

Tabela 1. Podział roślin uwzględniający zawartość procentową krzemu w suchej masie oraz stosunek stężenia krzemu do wapnia u wybranych gatunków roślin (wg MA i TAKAHASHI 2002).

Grupa roślin	Zawartość % Si w suchej masie roślin	Stosunek [Si]/[Ca]	Przykład gatunku*
rośliny akumulujące	> 1	> 1	<i>Oryza sativa</i> L. <i>Triticum aestivum</i> L.
średnio-akumulujące	0,5-1	0,5-1	<i>Glycine max</i> (L.) Merr. <i>Lycopersicon esculentum</i> L.
rośliny nieakumulujące	< 0,5	< 0,5	<i>Solanaceae</i> Juss. <i>Zea mays</i> L.

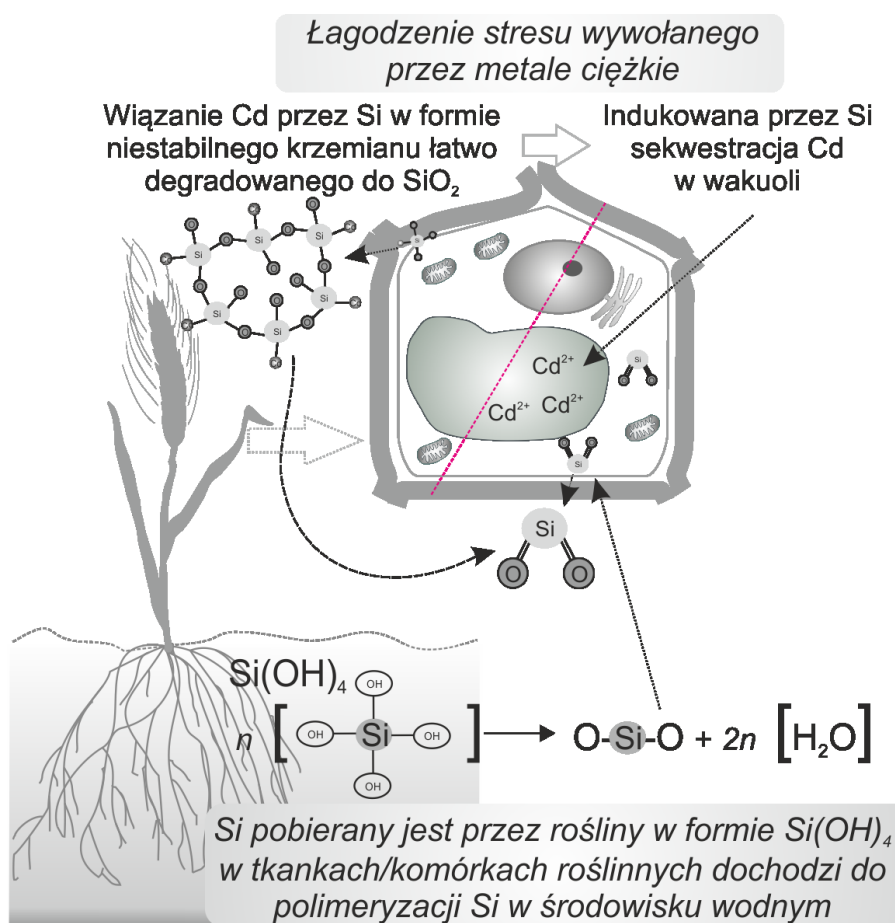
\*Dane zebrane przez HODSON i współaut. 2005.

RON i współaut. 2016). Identyfikacja transporterów krzemu w ryżu ujawniła unikatowy mechanizm jego transportu w roślinach (Ryc. 1). Wykazano, że w pobieraniu Si biorą udział dwa różne typy transporterów określane jako Lsi1 (ang. *low silicon rice 1*) i Lsi2 (ang. *Low silicon rice 2*). Lsi1 jest transporterem napływowym Si i należy do białek transbłonowych NIP (ang. *Nod26-like intrinsic proteins III*) podrodziny akwaporyn (MA i współaut. 2006). Transporter Lsi1 jest odpowiedzialny za transport Si z roztworu zewnętrznego do komórek korzenia. Natomiast Lsi2 jest transporterem wypływu Si, należącym do rodziny transporterów anionów (ang. *uncharacterized anion transporter family*). Lsi2 transportuje Si z komórki korzenia w kierunku ksylemu. Do pobierania Si przez korzenie wymagana jest obecność obu transporterów (TAMAI i MA 2003; MA i współaut. 2006, 2007). Stwierdzono, że Lsi1 i Lsi2 występują w błonach komórek egzodermy i endodermy korzenia (MA i współaut. 2006, 2007). Lsi2 aktywnie transportuje Si do walca osiowego i tym samym utrzymuje niskie stężenie krzemu w komórkach egzodermy i endodermy. Powstały gradient stężeń między endodermą i egzodermą z jednej strony, a korą pierwot-

ną i roztworem glebowym z drugiej napędza napływ Si przez Lsi1. Występowanie transportera napływu po jednej stronie i transportera wypływu po drugiej stronie komórki umożliwia skuteczny, międzykomórkowy transport tego pierwiastka z komórki do komórki (MA i współaut. 2007). Dodatkowo, badania oparte na modelowaniu *in silico* wykazały, że oprócz transporterów Lsi1 i Lsi2, do skutecznego wychwytu Si i jego akumulacji w komórkach wymagana jest również obecność pasemek Caspary'ego (hydrofobowe zgrubienia ściany komórkowej występujące w endodermie oraz egzodermie) w egzodermie i endodermie (SAKURAI i współaut. 2015). Obecność kwasu krzemowego wykazano w soku ksylemowym (MITANI i współaut. 2005). W liściach natomiast stwierdzono obecność Lsi6, homologa Lsi1, który jest transporterem odpowiedzialnym za transport Si z ksylemu i jego dystrybucję w liściu (YAMAJI i współaut. 2008). Ponieważ kwas ortokrzemowy jest małą nienaladowaną cząsteczką, to uważa się, że może on również dyfundować przez błonę plazmatyczną zgodnie z gradientem stężenia. Dodatkowo, NEUMANN i FIGUEIREDO (2002) wskazali proces endocytozy jako możliwy mechanizm transportu Si do wnętrza ko-

Tabela 2. Wykaz wybranych gatunków roślin, u których stwierdzono występowanie transporterów krzemu.

Gatunek	Nazwa transportera	Literatura
<i>Equisetum arvense</i> L. Skrzyp polny	EaLsi2-1 EaLsi2-2	VIVANCOS i współaut. 2016
<i>Cucurbita moschata</i> Duch. Dyńa piżmowa	CmLsi2-1 CmLsi2-2	MITANI i współaut. 2011
<i>Cucumis sativus</i> L. Ogórek siewny	CsLsi1	SUN i współaut. 2017
	CsLsi2	SUN i współaut. 2018
<i>Fragaria × ananassa</i> Duchesne Poziomka truskawka	FaLsi1 FaLsi2	OUELLETTE i współaut. 2017
<i>Glycine max</i> (L.) Merr. Soja warzywna	GmNIP2-1 GmNIP2-2	DESHMUKH i współaut. 2013
<i>Hordeum vulgare</i> L. Jęczmień zwyczajny	HvLsi1	CHIBA i współaut. 2009
	HvLsi2	YAMAJI i współaut. 2012
	HvLsi6	
<i>Oryza sativa</i> L. Ryż siewny	OsLsi1	MA i współaut. 2006, 2007
	OsLsi2	
	OsLsi6	YAMAJI i współaut. 2008
<i>Solanum tuberosum</i> L. Ziemniak zwyczajny	StLsi1	VULAVALA i współaut. 2016
<i>Triticum aestivum</i> L. Pszenica zwyczajna	TaLsi1	MONTPETIT i współaut. 2012
<i>Zea mays</i> L. Kukurydza zwyczajna	ZmLsi2	MITANI i współaut. 2009



Ryc. 3. Przemiany Si w komórkach roślinnych i związane z tym mechanizmy łagodzenia stresu wywołanego obecnością kadmu (wg LUYCKX i współaut. 2017, SAHEBI i współaut. 2015).

mórki. W Tabeli 2 przedstawiono dane literaturowe dotyczące obecności transporterów Si u różnych gatunków roślin.

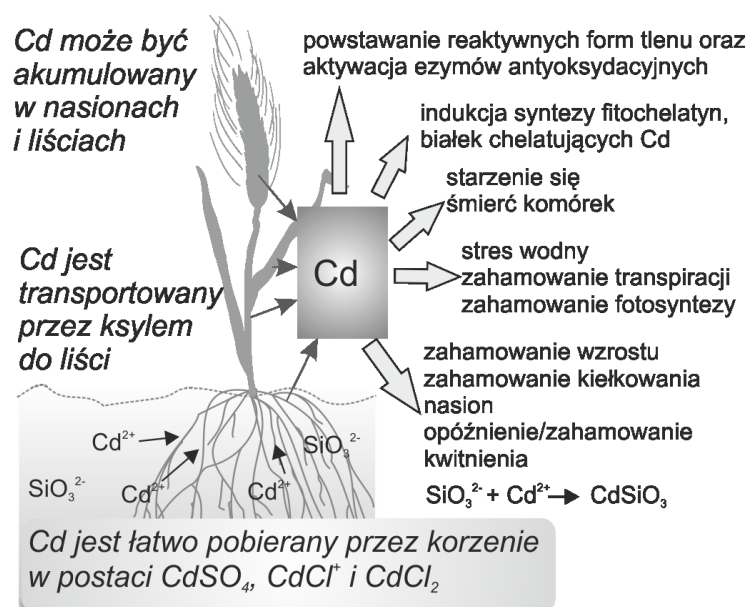
#### ROLA KRZEMU W ROZWOJU ROŚLIN I ŁAGODZENIU STRESÓW BIOTYCZNYCH I ABIOTYCZNYCH

Krzem jest uważany za nieistotny (lub quasi-niezbędny) dla wzrostu i rozwoju roślin. Rośliny dobrze rozwijają się pod jego nieobecność, chociaż w niektórych przypadkach, np. u skrzypu i ryżu, brak Si powoduje zwiększoną podatność roślin na infekcje wywołane przez grzyby (LUYCKX i współaut. 2017). Dowiedziono jednak, że suplementacja roślin krzemem łagodzi objawy stresów abiotycznych i biotycznych, w tym wywołanych przez metale ciężkie, zasolenie czy suszę. Mechanizm(y) tego procesu są nadal badane. Rycina 3 przedstawia udział Si w łagodzeniu stresu wywołanego obecnością kadmu (Cd).

Poniżej omówiono najważniejsze aspekty dotyczące wpływu Si na rozwój pszenicy

zwyczajnej, grochu zwyczajnego i lucerny siewnej.

Pszenica (*Triticum aestivum* L.) jest akumulatorem Si (MAYLAND i współaut. 1991). Jak wspomniano wcześniej, rośliny z rodziny Poaceae mogą odkładać Si w postaci ciał krzemowych wewnątrz komórek epidermy liści (BLACKMAN 1969, DIETRICH i współaut. 2003), ale również korzeni, gdzie wzmacniają ściany komórek endodermy i metaksylemu (BENNETT 1982, HODSON i SANGSTER 1989). W soku ksylemowym pszenicy zidentyfikowano dwa kwasy krzemowe:  $\text{H}_4\text{SiO}_4^*$  i  $(\text{HO})_3\text{Si}(\mu\text{-O})\text{Si}(\text{OH})_3^*$  (CASEY i współaut. 2003). W badaniach wykazano, że różne metody aplikacji Si (dodawanie do gleby, oprysk dolistny i moczenie nasion w roztworach zawierających Si) łagodziły negatywne skutki działania kadmu, m.in. poprzez zwiększenie: wzrostu roślin, fluorescencji chlorofilu, wymiany gazowej, efektywności wykorzystania wody i zawartości Si (HOWLADAR i współaut. 2018). Kadm negatywnie wpływa na rozwój roślin (Ryc. 4). Pierwiastek ten jest łatwo pobierany i transportowany w roślinie. Efekty jego toksycznego działania obserwuje się



Ryc. 4. Schemat przedstawiający pobieranie, transport i akumulację kadmu oraz wybrane efekty toksycznego działania kadmu na rośliny (wg GALLEGO i współaut. 2012, HAIDER i współaut. 2021).

zarówno na poziomie komórkowym (powstawanie reaktywnych form tlenu, peroksydacja lipidów), jak i całych organów (np. zahamowanie wzrostu korzeni) (GALLEGO i współaut. 2012, HAIDER i współaut. 2021). Negatywny wpływ Cd obserwuje się również w przypadku tak ważnych dla rośliny procesów jak kiełkowanie nasion czy kwitnienie (HAIDER i współaut. 2021). Istnieje więc potrzeba znalezienia metod, które łagodząby toksyczny wpływ Cd na rośliny. Podczas doświadczeń prowadzonych w uprawie hydroponicznej, suplementacja roślin Si powodowała zwiększenie biomasy roślin traktowanych Cd (SHI i współaut. 2018). Podobne korzystne działanie krzemu wykazano, gdy był on podawany jako nanocząstki czy w formie amorficznej krzemionki (UR RAHMAN i współaut. 2021a, RIZWAN i współaut. 2012). Aplikacja Si roślinom, które traktowane były Cd, istotnie wpłynęła na obniżenie akumulacji metalu ciężkiego w pędach pszenicy (RIZWAN i współaut. 2012, GREGER i współaut. 2016, THIND i współaut. 2021). Wykazano także, że Si znacząco hamuje pobieranie Cd przez korzenie pszenicy (SHI i współaut. 2018, WU i współaut. 2016). Dodatkowo, obniża on ekspresję genów związanych z pobieraniem Cd (np. *Lct1*) oraz ich wpływem do apoplastu czy wakuoli (np. *Hma2*). Z drugiej strony, dodanie Si powoduje zwiększoną ekspresję genu syntazy fitochelatyny i tworzenie samej fitochelatyny (polipeptydy odpowiedzialne za wychwytywanie metali ciężkich) w obecności Cd (GREGER i współaut. 2016). Należy zwrócić uwagę, że suplementacja Si prowadzi do poprawy zdolności antyoksydacyjnych

roślin traktowanych metalem ciężkim, poprzez m. in. zmniejszenie peroksydacji lipidów oraz zwiększenie aktywności dysmutazy ponadtlenkowej (SOD) i peroksydazy gwa-jakolowej (POD) w liściach (SHI i współaut. 2018, THIND i współaut. 2021) i korzeniach pszenicy (UR RAHMAN i współaut. 2021b). Korzystne działanie Si wykazano również w przypadku roślin narażonych na stres solny (HAJIBOLAND i współaut. 2017, ALZAHIRANI i współaut. 2018) i suszę (GONG i współaut. 2005, SCHALLER i współaut. 2021). Ostatnie dane wskazują również, że badane odmiany pszenicy różniły się znacząco pod względem akumulacji krzemu. Suplementacja krzemem nieznacznie poprawia wzrost roślin akumulujących większe ilości krzemu podczas stresu osmotycznego. Nie stwierdzono jednak istotnego wpływu Si na ich wzrost podczas stresu suszy. Zatem opisywany korzystny wpływ krzemu na rośliny narażone na stres suszy nie jest uniwersalny i może być specyficzny dla określonego genotypu (THORNE i współaut. 2021). Co ciekawe, wykazano, że podanie Si roślinom zainfekowanym bakterią *Xanthomonas translucens* pv. *undulosa* zwiększa ich odporność w wyniku m. in. lignifikacji ścian komórkowych (SILVA i współaut. 2010). Ponadto, suplementacja pszenicy krzemem miała negatywny wpływ na rozwój pluskwicy *Schizaphis graminum* (Rond.) ze względu na możliwe zmiany składu soku floemowego, w których pośredniczy Si (GOUSSAIN i współaut. 2005).

Trawy gromadzą większe ilości krzemu niż inne gatunki roślin, takie jak groch zwyczajny czy lucerna siewna. Gatunki, które

nie akumulują Si nie tworzą też w liściach fitolitów. Jednak obecność Si zanotowano w wiązках przewodzących, ścianach komórek epidermy, często w bliskim sąsiedztwie aparatów szparkowych, ale głównie na końcach włośń czepnych grochu (PARRY i WINSLOW 1977). Wykazano, że suplementacja Si wpływa korzystnie na pobieranie składników pokarmowych i plonowanie grochu (MERWAD 2018), a aplikacja Si łagodzi negatywne działanie metali ciężkich (TRIPATHI i współaut. 2015, XIAO i współaut. 2016, RAHMAN i współaut. 2017, JAN i współaut. 2018). Suplementacja roślin grochu krzemem spowodowała redukcję akumulacji Cd oraz zwiększenie pobierania makroelementów i mikroelementów przez rośliny traktowane kadmem (JAN i współaut. 2018). Wykazano także, że pod wpływem Si poprawiają się parametry wzrostu i rozwoju roślin grochu traktowanych Cd, np. wzrasta wydajności fotosyntezy (RAHMAN i współaut. 2017, JAN i współaut. 2018). Co ciekawe, podobnie jak w przypadku pszenicy, suplementacja krzemem roślin traktowanych Cd spowodowała indukcję transkrypcji genów odpowiedzialnych za syntezę fitochelatyn i metalotionein, sugerując zwiększoną sekwestrację Cd po aplikacji Si (RAHMAN i współaut. 2017). Wykazano, że jednym z mechanizmów ochronnych indukowanych przez Si w roślinach grochu traktowanych Cd lub narażonych na suszę, jest zwiększenie aktywności enzymów antyoksydacyjnych (m. in. katalazy, SOD, POD) oraz obniżenie poziomu reaktywnych form tlenu (RAHMAN i współaut. 2017, JAN i współaut. 2018, ARAFA i współaut. 2021). Badania wykazały samoistne tworzenie się charakterystycznej krzemionkowej nanopowłoki zewnątrzkomórkowej na komórkach korzeni grochu, która zwiększała odporność roślin na działanie aluminium (FENG i współaut. 2019). Sugeruje się również, że odporność roślin grochu na atak patogenu grzybowego (*Mycosphaerella pinodes*) może wynikać ze zwiększonej, pod wpływem aplikacji Si, aktywności enzymów takich jak chitynaza i  $\beta$ -1,3-glukanaza (DANN i MUIR 2002).

Również w przypadku lucerny siewnej (*Medicago sativa* L.) obserwowano pozytywny efekt suplementacji krzemem na jej rozwój (LIU i GUO 2013) oraz na łagodzenie stresów abiotycznych i biotycznych (KABIR i współaut. 2016, LIU i współaut. 2018, MENG i współaut. 2020, EL MOUKHTARI i współaut. 2021). Chociaż suplementacja Si wpływała na obniżenie pobierania i akumulacji Cd, to nie zanotowano różnic w ekspresji chelatorów metali (syntazy fitochelatyn, metalotionein i samej fitochelatyny), jak to miało miejsce w przypadku pszenicy i grochu (KABIR i

współaut. 2016). Natomiast, podobnie jak w przypadku pszenicy i grochu, suplementacja Si roślin lucerny narażonych na działanie Cd, stres solny i stres alkaliczny wywoływała zwiększenie aktywności enzymów antyoksydacyjnych (KABIR i współaut. 2016, MENG i współaut. 2020, LIU i współaut. 2018).

Przedstawione wyniki wskazują na wyraźny wpływ krzemu na aktywację stanu metabolicznego roślin i intensyfikację reakcji obronnych na bodźce zewnętrzne. Analiza procesów odpowiedzialnych za regenerację komórek roślinnych poddawanych stresowi może pomóc w zrozumieniu ich mechanizmu. Może także wzbogacić naszą wiedzę na temat ich przebiegu u kręgowców, w tym u ludzi, u których wiadomo, że prowadzi do wzmocnienia kości i tkanki łącznej oraz zmniejsza ryzyko łysienia, wystąpienia choroby Alzheimera i chorób sercowo-naczyniowych (DEVANNA i współaut. 2021). Regularne spożywanie owoców, warzyw i produktów pełnoziarnistych jest ujemnie skorelowane z ryzykiem rozwoju chorób przewlekłych (LIU 2013). Zawartość krzemu w żywności pochodzenia roślinnego, głównie w zbożach, jest znacznie wyższa niż w żywności pochodzenia zwierzęcego. Wśród produktów zbożowych najwyższy poziom Si stwierdzono w otrębach owsianych (23 mg/100 g), musli (12,2 mg/100 g) i otrębach pszenicznych o wysokiej zawartości błonnika (11,4 mg/100 g). Niestety, biodostępność Si jest bardzo niska, ponieważ jego większość zakumulowana jest w roślinach w postaci krzemionki fitolitycznej, często powiązanej z polisacharydowymi/węglowodanowymi składnikami ściany komórkowej i jest wchłaniana tylko w 1-20%, w zależności od źródła pożywienia (DEVANNA i współaut. 2021, FAROOQ i DIETZ 2015). Z tego względu w kręgu zainteresowań badaczy jest wykorzystanie np. biofortyfikacji, czyli procesu wzbogacania roślin w konkretne pierwiastki (np. krzem) poprzez hodowlę, techniki transgeniczne lub praktyki agronomiczne (FAROOQ i DIETZ 2015), co pozwoliłoby na zwiększenie ich ilości w jadalnych częściach roślin.

#### Streszczenie

Krzem (Si) jest pierwiastkiem występującym w dużych ilościach w skorupie ziemskiej. Rośliny z rodziny traw np. pszenica, pobierają Si z gleby i akumulują go w swoich tkankach w większych ilościach niż np. groch czy lucerna. Co ciekawe, suplementacja krzemem wpływa na zwiększenie plonu tych roślin. Ponadto, w wielu przypadkach Si niweluje negatywne skutki działania stresów biotycznych i abiotycznych, co wskazuje na uruchomienie w roślinach procesów o charakterze regeneracyjnym lub obronnym. Prezentowana praca przedstawia aktualny stan wiedzy na temat pobierania, transportu i efektów suplementacji krzemem roślin pszenicy, grochu i lucerny poddawanych stresom biotycznym i abiotycznym.

## LITERATURA

- ALZHRANI Y., KUŞVURAN A., ALHARBY H. F., KUŞVURAN S., RADY M. M., 2018. *The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium*. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 154, 187-196.
- ARAFA S. A., ATTIA K. A., NIEDBAŁA G., PIEKUTOWSKA M., ALAMERY S., ABDELAAL K. i współprac., 2021. *Seed priming boost adaptation in pea plants under drought stress*. *Plants* 10, doi: 10.3390/plants10102201.
- BENNETT D. M., 1982. *Silicon deposition in the roots of *Hordeum sativum* Jess, *Avena sativa* L. and *Triticum aestivum* L.* *Ann. Botan.* 50, 239-245.
- BLACKMAN E., 1969. *Observations on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*)*. *Can. J. Bot.* 47, 827-838.
- CASEY W. H., KINRADE S. D., KNIGHT C. T. G., RAINS D. W., EPSTEIN E., 2003. *Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L.* *Plant Cell Environ.* 27, 51-54.
- CHANDLER-EZELL K., PEARSALL D. M., ZEIDLER J. A., 2006. *Root and tuber phytoliths and starch grains document manioc (*Manihot esculenta*) arrowroot (*Maranta arundinacea*) and llerén (*Calathea* sp.) at the real alto site Ecuador*. *Econom. Botan.* 60, 103-120.
- CHIBA Y., MITANI N., YAMAJI N., MA J. F., 2009. *HvLsi1 is a silicon influx transporter in barley*. *Plant J.* 57, 810-818.
- CORNELIS J.-T., DELVAUX B., 2016. *Soil processes drive the biological silicon feedback loop*. *Funct. Ecol.* 30, 1298-1310.
- DANN E. K., MUIR S., 2002. *Peas grown in media with elevated plant-available silicon levels have higher activities of chitinase and  $\beta$ -1,3-glucanase, are less susceptible to a fungal leaf spot pathogen and accumulate more foliar silicon*. *Austral. Plant Pathol.* 31, doi: 10.1071/AP01047.
- DESHMUKH R. K., VIVANCOS J., GUÉRIN V., SONAH H., LABBÉ C., BELZILE F., BÉLANGER R. R., 2013. *Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in *Arabidopsis* and rice*. *Plant Mol. Biol.* 83, 303-315.
- DEVANNA B. N., MANDLIK R., RATURI G., SUDHAKARAN S. S., SHARMA Y., SHARMA S. i współprac., 2021. *Versatile role of silicon in cereals: Health benefits, uptake mechanism, and evolution*. *Plant Physiol. Biochem.* 165, 173-186.
- DIETRICH D., HINKE S., BAUMANN W., FEHLHABER R., BÄUCKER E., RÜHLE G. i współprac., 2003. *Silica accumulation in *Triticum aestivum* L. and *Dactylis glomerata* L.* *Anal. Bioanal. Chem.* 376, 399-404.
- EL MOUKHTARI A., CAROL P., MOURADI M., SAVOURE A., FARISSI M., 2021. *Silicon improves physiological, biochemical, and morphological adaptations of alfalfa (*Medicago sativa* L.) during salinity stress*. *Symbiosis* 85, 305-324.
- EPSTEIN E., 1994. *The anomaly of silicon in plant biology*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 91, 11-17.
- EPSTEIN E., 1999. *Silicon*. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50, 641-664.
- FAROOQ M. A., DIETZ K.-J., 2015. *Silicon as Versatile Player in Plant and Human Biology: Overlooked and Poorly Understood*. *Front. Plant Sci.* 6, doi: 10.3389/fpls.2015.00994.
- FENG Y., LI X., GUO S., CHEN X., CHEN T., HE Y. i współprac., 2019. *Extracellular silica nano-coat formed by layer-by-layer (LBL) self-assembly confers aluminum resistance in root border cells of pea (*Pisum sativum*)*. *J. Nanobiotechnol.* 17, doi: 10.1186/s12951-019-0486-y.
- GALLEGO S. M., PENA L. B., BARCIA R. A., AZPILICUETA C. E., IANNONE M. F., ROSALES E. P. i współprac., 2012. *Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms*. *Environ. Exp. Botan.* 83, 33-46.
- GONG H., ZHU X., CHEN K., WANG S., ZHANG C., 2005. *Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought*. *Plant Sci.* 169, 313-321.
- GOUSSAIN M. M., PRADO E., MORAES J. C., 2005. *Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behaviour of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae)*. *Neotrop. Entomol.* 34, 807-813.
- GREGER M., KABIR A. H., LANDBERG T., MAITY P. J., LINDBERG S., 2016. *Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat*. *Environ. Pollut.* 211, 90-97.
- GUNTZER F., KELLER C., MEUNIER J.-D., 2012. *Benefits of plant silicon for crops: a review*. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 201-213.
- HAIDER F. U., LIQUN C., COULTER J. A., CHEEMA S. A., WU J., ZHANG R. i współprac., 2021. *Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies*. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 211, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111887.
- HAIJBOLAND R., CHERGHVAREH L., DASHTEBANI F., 2017. *Effects of silicon supplementation on wheat plants under salt stress*. *J. Plant Proc. Funct.* 5, 1-11.
- HARRISON C. C., 1996. *Evidence for intramineral macromolecules containing protein from plant silicas*. *Phytochemistry* 41, 37-42.
- HODSON M. J., SANGSTER A. G., 1989. *Subcellular localization of mineral deposits in the roots of wheat (*Triticum aestivum* L.)*. *Protoplasma* 151, 19-32.
- HODSON M. J., WHITE P. J., MEAD A., BROADLEY M. R., 2005. *Phylogenetic variation in the silicon composition of plants*. *Ann. Botan.* 96, 1027-1046.
- HOWLADAR S. M., AL-ROBAI S. A., AL-ZHRANI F. S., HOWLADAR M. M., ALDHEBIANI A. Y., 2018. *Silicon and its application method effects on modulation of cadmium stress responses in *Triticum aestivum* (L.) through improving the antioxidative defense system and polyamine gene expression*. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 159, 143-152.
- JAN S., ALYEMENI M. N., WIJAYA L., ALAM P., SIDDIQUE K. H., AHMAD P., 2018. *Interactive effect of 24-epibrassinolide and silicon alleviates cadmium stress via the modulation of antioxidant defense and glyoxalase systems and macronutrient content in *Pisum sativum* L. seedlings*. *BMC Plant Biol.* 18, doi: 10.1186/s12870-018-1359-5.
- JARVIS S. C., 1987. *The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat*. *Plant Soil* 97, 429-437.
- JONES L., HANDRECK K. A., 1967. *Silica In Soils, Plants, and Animals*. *Adv. Agronom.* 19, 107-149.
- KABIR A. H., HOSSAIN M. M., KHATUN M. A., MANDAL A., HAIDER S. A., 2016. *Role of Silicon Counteracting Cadmium Toxicity in Alfalfa (*Medicago sativa* L.)*. *Front. Plant Sci.* 7, doi: 10.3389/fpls.2016.01117.
- KNIGHT C. T. G., KINRADE S. D., 2001. *A primer on the aqueous chemistry of silicon*. [W:] *Silicon in Agriculture*. DATNOFF. L. E., SNYDER G.



- H., KORNDÖRFER G. H. (red.). Elsevier Science, 57-81.
- KOLESNIKOV M. P., GINS V. K., 2001. *Forms of silicon in medicinal plants*. Appl. Biochem. Microbiol. 37, 524-527.
- LIANG Y., NIKOLIĆ M., BÉLANGER R. R., GONG H., SONG A., 2015. *Silicon in agriculture. From theory to practice/Yongchao Liang, Miroslav Nikolic, Richard Bélanger, Haijun Gong, Alin Song*: Springer Science+Business Media. Dordrecht, New York, New York.
- LIU D., LIU M., LIU X.-L., CHENG X.-G., LIANG Z.-W., 2018. *silicon priming created an enhanced tolerance in alfalfa (Medicago sativa L.) seedlings in response to high alkaline stress*. Front. Plant Sci. 9, doi: 10.3389/fpls.2018.00716.
- LIU H. X., GUO Z. G., 2013. *Forage yield and water use efficiency of alfalfa applied with silicon under water deficit conditions*. Philippine Agricult. 96, 370-376.
- LIU R. H., 2013. *Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet*. Adv. Nutrit. 4, 384S-392S.
- LUYCKX M., HAUSMAN J.-F., LUTTS S., GUERRIERO G., 2017. *Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives*. Front. Plant Sci. 8, doi: 10.3389/fpls.2017.00411.
- MA J. F., TAKAHASHI E., 2002. *Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan*. Elsevier Science.
- MA J. F., YAMAJI N., 2006. *Silicon uptake and accumulation in higher plants*. Trends Plant Sci. 11, 392-397.
- MA J. F., TAMAI K., YAMAJI N., MITANI N., KONISHI S., KATSUHARA M. i współaut., 2006. *A silicon transporter in rice*. Nature 440, 688-691.
- MA J. F., YAMAJI N., MITANI N., TAMAI K., KONISHI S., FUJIWARA T. i współaut., 2007. *An efflux transporter of silicon in rice*. Nature 448, 209-212.
- MARRON A. O., RATCLIFFE S., WHEELER G. L., GOLDSTEIN R. E., KING N., NOT F. i współaut., 2016. *The evolution of silicon transport in eukaryotes*. Mol. Biol. Evol. 33, 3226-3248.
- MAYLAND H. F., WRIGHT J. L., SOJKA R. E., 1991. *Silicon accumulation and water uptake by wheat*. Plant Soil, 137, 191-199.
- MENG Y., YIN Q., YAN Z., WANG Y., NIU J., ZHANG J., FAN K., 2020. *Exogenous Silicon Enhanced Salt Resistance by Maintaining K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> Homeostasis and Antioxidant Performance in Alfalfa Leaves*. Front. Plant Sci. 11, doi: 10.3389/fpls.2020.01183.
- MERWAD A.-R. M. A., 2018. *Response of yield and nutrients uptake of pea plants to silicate under sandy soil conditions*. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 49, 1553-1562.
- MITANI N., MA J. F., IWASHITA T., 2005. *Identification of the silicon form in xylem sap of rice (Oryza sativa L.)*. Plant Cell Physiol. 46, 279-283.
- MITANI N., CHIBA Y., YAMAJI N., MA J. F., 2009. *Identification and characterization of maize and barley Lsi2-like silicon efflux transporters reveals a distinct silicon uptake system from that in rice*. Plant Cell 21, 2133-2142.
- MITANI N., YAMAJI N., AGO Y., IWASAKI K., MA J. F., 2011. *Isolation and functional characterization of an influx silicon transporter in two pumpkin cultivars contrasting in silicon accumulation*. Plant J. 66, 231-240.
- MONTPETIT J., VIVANCOS J., MITANI-UENO N., YAMAJI N., RÉMUS-BOREL W., BELZILE F. i współaut., 2012. *Cloning, functional characterization and heterologous expression of TaLsi1, a wheat silicon transporter gene*. Plant Mol. Biol. 79, 35-46.
- NEUMANN D., FIGUEIREDO C. DE, 2002. *A novel mechanism of silicon uptake*. Protoplasma 220, 59-67.
- OUELLETTE S., GOYETTE M.-H., LABBÉ C., LAUR J., GAUDREAU L., GOSSELIN A. i współaut., 2017. *Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions*. Front. Plant Sci. 8, doi: 10.3389/fpls.2017.00949.
- PARRY D. W., WINSLOW A., 1977. *Electron-probe microanalysis of silicon accumulation in the leaves and tendrils of Pisum sativum (L.) following root severance*. Ann. Bot. 41, 275-278.
- PERRY C. C., KEELING-TUCKER T., 2000. *Biosilicification: the role of the organic matrix in structure control*. J. Biol. Inorgan. Chem. 5, 537-550.
- RAHMAN M. F., GHOSAL A., ALAM M. F., KABIR A. H., 2017. *Remediation of cadmium toxicity in field peas (Pisum sativum L.) through exogenous silicon*. Ecotoxicol. Environ. Safety 135, 165-172.
- RIZWAN M., MEUNIER J.-D., MICHE H., KELLER C., 2012. *Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (Triticum turgidum L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination*. J. Hazardous Mat. 209-210, 326-334.
- SAHEBI M., HANAFI M. M., SITI NOR AKMAR A., RAFII M. Y., AZIZI P., TENGOUA F. F. i współaut., 2015. *Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants*. BioMed Res. Int. 2015, DOI: 10.1155/2015/396010.
- SAKURAI G., SATAKE A., YAMAJI N., MITANI-UENO N., YOKOZAWA M., FEUGIER F. G., MA J. F., 2015. *In silico simulation modeling reveals the importance of the Casparian strip for efficient silicon uptake in rice roots*. Plant Cell Physiol. 56, 631-639.
- SANGSTER A. G., HODSON M. J., 1992. *Silica deposition in subterranean organs*. [W:] Phytolith Systematics. Emerging Issues. RAPP G., MULLHOLLAND S. C. (red.). Adv. Archaeol. Museum Sci., 239-251.
- SANGSTER A. G., HODSON M. J., TUBB H. J., 2001. *Silicon deposition in higher plants*. [W:] Silicon in Agriculture. DATNOFF L. E., SNYDER G. H., KORNDÖRFER G. H. (red.). Elsevier Science, 85-113.
- SAUER D., SACCONI L., CONLEY D. J., HERRMANN L., SOMMER M., 2006. *Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments*. Biogeochemistry 80, 89-108.
- SCHALLER J., SCHERWIETES E., GERBER L., VAIDYA S., KACZOREK D., PAUSCH J. i współaut., 2021. *Silica fertilization improved wheat performance and increased phosphorus concentrations during drought at the field scale*. Sci. Rep. 11, doi: 10.1038/s41598-021-00464-7.
- SHI Z., YANG S., HAN D., ZHOU Z., LI X., LIU Y., ZHANG B., 2018. *Silicon alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (Triticum aestivum L.) by reducing cadmium ion uptake and enhancing antioxidative capacity*. Environ. Sci. Pollut. Res. 25, 7638-7646.
- SILVA I. T., RODRIGUES F. Á., OLIVEIRA J. R., PEIREIRA S. C., ANDRADE C. C. L., SILVEIRA P. R., CONCEIÇÃO M. M., 2010. *Wheat resistance to bacterial leaf streak mediated by silicon*. J. Phytopathol. 158, 253-262.
- SOURI Z., KHANNA K., KARIMI N., AHMAD P., 2020. *Silicon and plants: current knowledge and fu-*

- ture prospects. *J. Plant Growth Regul.* 40, 906-925.
- SUN H., GUO J., DUAN Y., ZHANG T., HUO H., GONG H., 2017. *Isolation and functional characterization of CsLsi1, a silicon transporter gene in Cucumis sativus.* *Physiologia Plantarum* 159, 201-214.
- SUN H., DUAN Y., QI X., ZHANG L., HUO H., GONG H., 2018. *Isolation and functional characterization of CsLsi2, a cucumber silicon efflux transporter gene.* *Ann. Botan.* 122, 641-648.
- TAKAHASHI E., MA J. F., MIYAKE Y., 1990. *The possibility of silicon as an essential element for higher plants.* *Comm. Agricult. Food Chem.* 2, 99-122.
- TAMAI K., MA J. F., 2003. *Characterization of silicon uptake by rice roots.* *New Phytol.* 158, 431-436.
- THIND S., HUSSAIN I., ALI S., RASHEED R., ASHRAF M. A., 2021. *Silicon application modulates growth, physio-chemicals, and antioxidants in wheat (Triticum aestivum L.) Exposed to Different Cadmium Regimes.* *Int. Hormesis Soc.* 19, doi: 10.1177/15593258211014646.
- THORNE S. J., HARTLEY S. E., MAATHUIS F. J. M., 2021. *The effect of silicon on osmotic and drought stress tolerance in wheat landraces.* *Plants* 10, doi: 10.3390/plants10040814.
- TRIPATHI D. K., SINGH V. P., PRASAD S. M., CHAUHAN D. K., DUBEY N. K., 2015. *Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in Pisum sativum (L.) seedlings.* *Plant Physiol. Biochem.* 96, 189-198.
- UR RAHMAN S., XUEBIN Q., ZHAO Z., DU Z., IMTIAZ M., MEHMOOD F. i współaut., 2021a. *Alleviatory effects of Silicon on the morphology, physiology, and antioxidative mechanisms of wheat (Triticum aestivum L.) roots under cadmium stress in acidic nutrient solutions.* *Sci. Rep.* 11, doi: 10.1038/s41598-020-80808-x.
- UR RAHMAN S., XUEBIN Q., YASIN G., CHENG H., MEHMOOD F., ZAIN M. i współaut., 2021b. *Role of silicon on root morphological characters of wheat (Triticum aestivum L.) plants grown under Cd-contaminated nutrient solution.* *Acta Physiol. Plant.* 43, doi: 10.1007/s11738-021-03228-y.
- VIVANCOS J., DESHMUKH R., GRÉGOIRE C., RÉMUSBOREL W., BELZILE F., BÉLANGER R. R., 2016. *Identification and characterization of silicon efflux transporters in horsetail (Equisetum arvense).* *J. Plant Physiol.* 200, 82-89.
- VULAVALA V. K. R., ELBAUM R., YERMIYAHU U., FOGELMAN E., KUMAR A., GINZBERG I., 2016. *Silicon fertilization of potato: expression of putative transporters and tuber skin quality.* *Plant* 243, 217-229.
- WU J., GEILFUS C.-M., PITANN B., MÜHLING K.-H., 2016. *Silicon-enhanced oxalate exudation contributes to alleviation of cadmium toxicity in wheat.* *Environ. Exp. Botan.* 131, 10-18.
- XIAO W., YUQIAO L., QIANG Z., MATICHENKOV V., BOCHARNIKOVA E., DÅSTØL M., 2016. *Efficacy of Si fertilization to modulate the heavy metals absorption by barley (Hordeum vulgare L.) and pea (Pisum sativum L.).* *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23, 20402-20407.
- YAMAJI N., MITATNI N., MA J. F., 2008. *A transporter regulating silicon distribution in rice shoots.* *Plant Cell* 20, 1381-1389.
- YAMAJI N., CHIBA Y., MITANI-UENO N., FENG MA J., 2012. *Functional characterization of a silicon transporter gene implicated in silicon distribution in barley.* *Plant Physiol.* 160, 1491-1497.
- ZAJĄCZKOWSKA A., KORZENIOWSKA J., 2020. *Wpływ nawożenia krzemem na zmniejszenie szkodliwego wpływu metali ciężkich dla roślin.* *Studia i Raporty IUNG-PIB* 63, 179-197.

## KOSMOS Vol. 71, 1, 35–44, 2022

KATARZYNA GŁOWACKA<sup>1</sup>, MAŁGORZATA SZULTKA-MŁYŃSKA<sup>2</sup>, MATEUSZ CICHOREK<sup>1</sup>, ALEKSANDRA ORZOL<sup>2</sup>, AGNIESZKA ROGOWSKA<sup>3</sup>, EDITH CRUZADO-TAFUR<sup>1</sup>, PAWEŁ POMASTOWSKI<sup>3</sup>, RYSZARD GÓRECKI<sup>1</sup>, BOGUSŁAW BUSZEWSKI<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Plant Physiology, Genetics and Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, 1a Oczapowskiego Str., 10-719 Olsztyn, <sup>2</sup>Department of Environmental Chemistry and Bioanalytics, Faculty of Chemistry, Nicolaus Copernicus University, 7 Gagarin Str., 87-100 Torun, <sup>3</sup>Centre for Modern Interdisciplinary Technologies, Nicolaus Copernicus University, 4 Wileńska Str., 87-100 Torun, E-mail: katarzyna.glowacka@uwm.edu.pl, mszultka@umk.pl, mateusz.cichorek@uwm.edu.pl, ola.orzol@umk.pl, aga4356@wp.pl, edith.cruzado@uwm.edu.pl, p.pomastowski@umk.pl, rigor@uwm.edu.pl, bbusz@chem.umk.pl

### THE IMPORTANCE OF SILICON FOR SELECTED PLANT SPECIES

#### Summary

Silicon (Si) is one of the most abundant elements in the earth crust. Plants from the grass family, e.g. wheat, take up Si from soil and accumulate it in their tissues in greater amounts than, for example, pea or alfalfa. Interestingly, silicon supplementation increases the yield of these plants. Moreover, in many cases Si reduces the negative effects of biotic and abiotic stresses, that perhaps triggers regenerative and defense processes in plants. The work presents the current state of knowledge on the uptake, transport and effects of silicon supplementation on wheat, pea and alfalfa plants under biotic and abiotic stresses.

Key words: alfalfa, biotic and abiotic stresses, pea, silicon, wheat