

## Biologiczne znaczenie krzemu oraz jego interakcje z innymi pierwiastkami

Karol Węglarzy, Małgorzata Bereza

*Instytut Zootechniki – Państwowy Instytut Badawczy,  
Zootechniczny Zakład Doświadczalny, Grodziec Śląski, Sp. z o.o., 43-386 Świętoszówka*

Pierwiastki śladowe stanowią ważny element umożliwiający zachowanie homeostazy organizmów żywych, a szczególnie zwierząt wysokoprodukcyjnych. Od ich właściwego poziomu w tkankach i płynach ustrojowych zależy prawidłowy rozwój i zdrowotność organizmu, a możliwy z powodu ich niedoborów spadek produktywności zwierząt stanowi ważny aspekt ekonomiczny. Rozwój badań, który nastąpił w ostatnim czasie, pozwolił na zdefiniowanie szeregu nowych funkcji pierwiastków śladowych, jakie spełniają w organizmach zwierzęcych, a ich odpowiedni poziom może być elementem żywności funkcjonalnej.

Jednym z takich mikroelementów jest **krzem**. Rosnące zainteresowanie krzemem jest związane z odkryciem jego nowych funkcji w prawidłowym rozwoju i zachowaniu zdrowia zwierząt oraz szczególnym znaczeniu dla organizmu ludzkiego.

Krzem jest pierwiastkiem śladowym, który występuje w organizmach żywych w stężeniach poniżej 1 mg, przy czym najczęściej w ilościach rzędu  $10^{-2}$  –  $10^{-4}$  mg w odniesieniu do suchej masy. Źródłem pierwiastków dla organizmów żywych są zewnętrzne strefy Ziemi. Krzem występuje w skorupie Ziemi; jego udział wynosi 26,95-28% wag. O udziale pierwiastków chemicznych, a szczególnie śladowych, w budowie organizmów żywych decyduje szereg różnych czynników, często ściśle ze sobą powiązanych. Do najważniejszych związków krzemu należą krzemionka, kwasy krzemowe i ich sole, krzemiany oraz chlorosilany i alkoksylany. Krzemionka występuje w różnych odmianach polimorficznych w postaci kwarcu, trydymitu

czy krystobalitu oraz krzemianów i glinokrzmianów. Krzem jest na ogół mało ruchliwym pierwiastkiem, jednak pod wpływem wietrzenia skał podlega migracji w stanie rozpuszczonym lub koloidalnym. Krzemionka ( $\text{SiO}_2$ ) jest głównym składnikiem wszystkich skał magmowych i na jej udziale oparto ich klasyfikację: skały ultrazasadowe zawierają jej  $\leq 44\%$  wag. zasadowe 44-53% wag., pośrednie 53-65% wag., kwaśne  $\geq 65\%$  wag. (Kabata-Pendias i Pendias, 1999). Organizmy zwierzęce zawierają różne ilości krzemu, a ich udział zależy od środowiska życia:

rośliny:	morskie	0,15 – 0,20% wag. s.m.
	lądowe	$\leq 0,1\%$ wag. s.m.
zwierzęta:	morskie	
	tkanki miękkie	0,02-0,1 ppm s.m.
	tkanki twarde	0,08-42 ppm s.m.
	ryby	0,01 ppm s.m.
	lądowe (ssaki)	
	mięśnie, kości	100-150 ppm s.m.

Za niezbędne dla zwierząt i człowieka uważa się obecnie około 20 pierwiastków, wśród których znajduje się również krzem. Aby uzyskać efekt żywieniowy lub kliniczny, krzem musi znajdować się w formie dostępnej dla organizmu, umożliwiającej absorpcję w przewodzie pokarmowym. Stwierdzono, że poziom krzemu w surowicy krwi znacząco wzrasta po pobraniu bogatej w krzem żywności, natomiast mechanizm absorpcji krzemu nie został dotąd poznany (Spripanyakorn i in., 2005). Spośród wszystkich związków krzemu za przyswajalny uznawany jest kwas ortokrzemowy ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ).

Krzem jest bardzo ważnym mikroelementem, biorącym udział w wielu procesach życiowych organizmu, powodującym regenerację tkanek oraz wzmacniającym odporność organizmu. Oprócz podstawowego działania w metabolizmie tkanki łącznej, opisywanego przez różnych autorów, wykazano jego działanie przeciwnowotworowe, przeciwmiażdżycowe i przeciw cukrzycowe (Boguszevska i in., 2003). Badania tych autorów przeprowadzone na trzech grupach pacjentów: niewykazujących objawów chorobowych, ze stabilną niedokrwienną chorobą serca oraz chorych ze świeżo przebyłym zawałem mięśnia sercowego wykazały, że stężenie krzemu w surowicy krwi w 2 i 3 grupie pacjentów były znacząco niższe niż w grupie 1 - bez objawów chorobowych. Stężenie krzemu w surowicy krwi osób po świeżo przebyłym zawale mięśnia sercowego było niższe niż w osoczu krwi pacjentów chorych na niedokrwienną chorobę serca. Według autorów, niski poziom krzemu w organizmie może zwiększać ryzyko miażdżycy, prowadząc do ostrej i przewlekłej formy choroby niedokrwiennej serca, m.in. wpływając na elastyczność tętnic.

### Występowanie w przyrodzie i biodostępność

Według różnych autorów, w skorupie ziemskiej znajduje się 26,95-28% krzemu, który występuje w formie dwutlenku krzemu i krzemianów (Friedberg i Schiller, 1998; Kabata-Pendias i Pendias, 1999). Krzem jest obecny w wodzie jako kwas ortokrzemowy. Kwas krzemowy może także występować w postaci oligomerów i kwasu polikrzemowego, który jest koloidem.

U zwierząt krzem występuje jako kwas krzemowy, który może odgrywać rolę w organizacji strukturalnej części mukopolisacharydów (Nielsen, 1994). U piskląt i szczurów pierwiastek ten bierze udział w tworzeniu i metabolizmie kości (Nielsen, 1994). Szczury pozbawione krzemu wykazują obniżenie poziomu hydroksyproliny i aktywności fosfatazy zasadowej i kwasnej (Seaborn i Nielsen, 1993, 1994). Pozbawienie szczurów krzemu osłabia ponadto tworzenie kolagenu i kości oraz obniża efektywność transaminazy ornityny, kluczowego enzymu w syntezie proliny (Seaborn i Nielsen, 2002). Krzem powoduje wzrost aktywności  $H_4SiO_4$  i enzymów, które modyfikują kolagen oraz bierze udział w kalcyfikacji (Nielsen, 1994).

Rola krzemu u ludzi nie jest jeszcze dobrze poznana, lecz w badaniach *in vitro* wykazano, że kwas ortokrzemowy w stężeniach fizjologicznych stymuluje syntezę kolagenu i poprzez wzrost aktywności prolylohydroksylazy w ludzkich osteoblastach przyczynia się do ich różnicowania (Reffitt i in., 2003).

### Interakcje z innymi makro- i mikroelementami

Krzem jest pierwiastkiem stanowiącym antidotum na toksyczne działanie glinu, redukującym jego biodostępność. Nawet niewielki poziom krzemu w wodzie zabezpiecza ryby przed toksycznym działaniem aluminium. Podobnie, u szczurów narażonych na działanie glinu krzem ogranicza jego odkładanie w mózgu, chociaż nie zabezpiecza organizmu szczura przed jego działaniem toksycznym (Belles i in., 1998, 1999). Jugdaohsingh i in. (2000) wykazali, że w organizmach ludzkich oligomery kwasu krzemowego zabezpieczają przed absorpcją glinu, natomiast kwas krzemowy nie wykazuje takiego działania. W badaniach Bella i in. (1996) krzem pochodzący z piwa stymulował wydalanie glinu z organizmu, czego jednak nie potwierdziły ostatnie badania nad kwasem monokrzemowym (Jugdaohsingh i in., 2000). Wykazano, że u pacjentów, u których w surowicy krwi występował wysoki poziom krzemu, stężenie glinu w surowicy krwi było niższe. Stąd sugestia, że u pacjentów z wysokim poziomem glinu w surowicy krwi, w celu zabezpieczenia organizmu przed jego toksycznym działaniem należy podnieść poziom krzemu w surowicy do 100–150  $\mu\text{mol/l}$ .

Stężenie krzemu w surowicy krwi wynosi 2-10  $\mu\text{M}$  i wrasta do 20-30  $\mu\text{M}$  po posiłkach. Wydalanie z moczem wynosi około 700  $\mu\text{mol/dzień}$ , co stanowi około 19,6 mg krzemu/dzień (Jugdaohsingh i in., 2000; Reffitt i in., 1999).

Dzienna dawka krzemu w populacji północnoamerykańskiej określona przez Jugdaohsingha i in. (2002) wynosiła u mężczyzn 30-33 mg/dzień, a u kobiet 24-25 mg/dzień, przy czym dawka ta obniżała się wraz z wiekiem.

Dzienna dawka krzemu w diecie Brytyjczyków wynosiła 20–50 mg/dzień (Bellia i in., 1994; Pennington, 1991), przy czym 55% pochodziło z wody, kawy i piwa, 14% z produktów zbożowych i 8% z warzyw. Przyjmuje się, że

dzienna dawka krzemu powinna wynosić 20–50 mg/dzień, co odpowiada 0,3–0,8 mg/kg ciała/dzień dla człowieka o masie 60 kg.

Z zalecanej dawki krzemu 20–50 mg/dzień znacząca część jest wydalana z moczem (8,7–33,1 mg/24 h), co sugeruje, że krzem z produktów diety jest dobrze przyswajany z przewodu pokarmowego (Reffitt i in., 1999). Popplewell i in. (1998) wykorzystywali <sup>32</sup>Si i określali krzem w moczu za pomocą spektroskopii masowej. W ciągu 48 godzin 36% z dostępnego krzemu zostało wydalane z moczem. Badania Reffitt i in. (1999) określiły, że pobierany wraz z wodą kwas ortokrzemowy w ilości 27–55 mg/l (przez 6 mężczyzn i 2 kobiety) był wydalany w ilości około 50% (21–74%). Badania Jugdaohsingha i in. (2000) potwierdzają biodostępność obu kwasów krzemowych: monokrzemowego i ortokrzemowego. Kwas monokrzemowy był wydalany w 53% wraz z moczem, natomiast oligomery kwasu krzemowego występowały w moczu w niewielkich ilościach.

Kwas krzemowy hamuje wchłanianie glinu, najobficiej występującego w biosferze neurotoksycznego metalu o działaniu neurodegeneracyjnym, najprawdopodobniej będącego przyczyną choroby Alzheimera. Badania Bellesa i in. (1998), prowadzone na szczurach, potwierdziły hamujące działanie krzemu w stosunku do glinu. Szczerom, podawano dawkę związków glinu w ilości 450 mg/dzień przez 5 tygodni (5 dni w tygodniu) oraz w wodzie pitnej różne dawki krzemu: 59 i 118 mg Si/l/dzień. Analiza stężenia glinu w mózgu, wątrobie, kościach i śledzionie wykazała, że jego poziom był znacząco niższy u szczurów, którym podawano krzem w ilościach

59 i 118 mg Si/l/dzień niż u zwierząt grupy kontrolnej, której nie podawano dodatkowo dawek krzemu. Krzem zapewniał efektywne wchłanianie glinu przez przewód pokarmowy.

W badaniach Budzyńskiej i in. (2006), prowadzonych na krowach mlecznych rasy hf, określano w sierści krów, będących w pierwszej lub drugiej laktacji, stopień akumulacji i korelacje między makro- i mikroelementami pełniącymi funkcje fizjologiczne i budulcowe. Poziom krzemu oznaczony w sierści badanych krów wynosił 11,2 mg/kg s.m. Najwyższe korelacje występowały między Si a S (0,816), P (0,458), Mg (0,486) i Ca (0,205) oraz Zn (0,705), Cu (0,752), Fe (1,000) i K (0,705).

### **Podsumowanie**

1. Badania przeprowadzone przez różnych autorów oraz uzyskiwane wyniki świadczą o ważnej roli krzemu w procesach metabolicznych organizmów zwierzęcych.
2. Zapewnienie właściwego poziomu krzemu w tkankach zabezpiecza organizmy zwierzęce przed absorpcją neurotoksycznego glinu.
3. Opisane wyniki badań sierści krów wskazują na dodatnie korelacje krzemu z wieloma pierwiastkami, które są składnikami budulcowymi, pełnią funkcje w metabolizmie organizmów zwierzęcych oraz są ważnymi elementami gospodarki wodno-elektrolitowej.
4. Z punktu widzenia produkcji żywności funkcjonalnej istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań z uwzględnieniem tego pierwiastka w żywieniu zwierząt gospodarskich.

### **Literatura**

Belles M., Sanchez D.J., Gomez M., Corbella J., Domingo J.L. (1998). Silicon reduces aluminum accumulation in rats: relevance to the aluminum hypothesis of Alzheimer disease. *Alzheimer Dis. Assoc. Disord.*, 12: 83-87.

Bellia J.P., Newton K., Davenport A., Birchall J.D., Roberts N.B. (1994). Silicon and aluminum and their inter-relationship in serum and urine after renal transplantation. *Eur. J. Clin. Invest.*, 24: 703-710.

Boguszewska A., Pasternak K., Sztanke M. (2003). Stężenie krzemu w osoczu krwi pacjentów ze świeżym zawałem mięśnia sercowego i stabilną

chorobą niedokrwienną serca. *J. Elementol.*, 8, 4.

Budzyńska M., Krupa W., Sołtys L., Sapała M., Kamieniak J., Budzyński M. (2006). Poziom biopierwiastków w sierści krów mlecznych. *Ann. UMCS*, 44: 327-333.

Friedberg K.D., Schiller E. (1998). Silicon in Seiler HG, Singel H and Singel A. *Handbook on toxicity of inorganic compounds*. Marcel Dekker Inc. New York and Basel, pp. 596-618.

Jugdaohsingh R., Reffitt D.M., Oldham C., Day J.P.,



- Fifield L.K., Thompson R.P., Powell J.J. (2000). Oligomeric but not monomeric silica prevents aluminum absorption in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, 71: 944-949.
- Jugdaohsingh R., Anderson S.H., Tucker K.L., Elliot H., Kiel D.P., Thompson R.P., Powell J.J. (2002). Dietary silicon intake and absorption. *Am. J. Clin. Nutr.*, 75: 887-893.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. (1999). *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Nielsen F.H. (1994). In: *Silicon. Modern nutrition*. Shils M.M., Olson J.A., Shike M (eds), 8th edition. Lea and Febiger, Philadelphia, pp. 281-282.
- Pennington J.A. (1991). Silicon in foods and diets. *Food Addit. Contam.*, 8: 97-118.
- Popplewell J.F., King S.J., Day J.P., Ackrill P., Fifield L.K., Cresswell R.G., di Tada M.L., Liu K. (1998). Kinetics of uptake and elimination of silicic acid by a human subject: A novel application of  $^{32}\text{Si}$  and accelerator mass spectrometry. *J. Inorg. Biochem.*, 69: 177-180.
- Reffitt D.M., Jugdaohsingh R., Thompson R.P., Powell J.J. (1999). Silicic acid: its gastrointestinal uptake and urinary excretion in man and effects on aluminum excretion. *J. Inorg. Biochem.*, 76: 141-147.
- Reffitt D.M., Ogston N., Jugdaohsingh R., Cheung H.F., Evans B.A., Thompson R.P., Powell J.J., Hampson G.N. (2003). Orthosilicic acid stimulates collagen type 1 synthesis and osteoblastic differentiation in human osteoblast-like cells *in vitro*. *Bone*, 32: 127-135.
- Seaborn C.D., Nielsen F.H. (1993). Silicon: A nutritional beneficence for bone, brains and blood vessels? *Nutr. Today*, 28:13-18.
- Seaborn C.D., Nielsen F.H. (1994). Dietary silicon affects acid and alkaline phosphatase and  $^{45}\text{Ca}$  uptake in bone of rats. *J. Trace. Elem. Exp. Med.*, 7: 11-18.
- Seaborn C.D., Nielsen F.H. (2002). Silicon deprivation decreases collagen formation in wounds and bone, and ornithine transaminase enzyme activity in liver. *Biol. Trace. Elem. Res.*, 89: 251-261.
- Sripanyakorn S., Jugdaohsingh R., Richard P., Thompson H., Powell J.J. (2005). Dietary silicon and bone health, *Nutr. Bull.*, 30 (3): 222-230.

## BIOLOGICAL IMPORTANCE OF SILICA AND ITS INTERACTIONS WITH OTHER ELEMENTS

### Summary

Considerable advances in research that have been achieved in recent years made it possible to define several new functions of trace elements in animal organisms. One of these trace elements is silica, which takes



Owczarek Podhalański (fot. A. Kawęcka)  
*Tatra Shepherd Dog* (photo A. Kawęcka)

part in many life processes of animals related to connective tissue metabolism and tissue regeneration. Silica has been found to show anticancerous, antiatherosclerotic and antidiabetic action. The high level of silicic acid inhibits the absorption of aluminium by the animal body. Studies with dairy cows have shown that silica is significantly correlated with major and trace elements performing physiological, building and regulatory functions.