

Występowanie i przemieszczanie jodu w systemie gleba–roślina

Piotr Strzetelski

*Katedra Fizjologii Roślin,
Akademia Rolnicza im. H. Kołłątaja w Krakowie
Al. 29-Listopada 54, 31-425 Kraków
e-mail: pistrzet@krokus.ogr.ar.krakow.pl*

Słowa kluczowe: jod, system gleba-roślina, warzywa, biofortyfikacja*

Wstęp – znaczenie, źródła i obieg jodu w przyrodzie

Jod jest jednym z ważniejszych pierwiastków chemicznych koniecznych dla prawidłowego funkcjonowania organizmu ludzi i zwierząt. Już Chińczycy w czasach przed narodzeniem Chrystusa stosowali niektóre produkty pochodzenia morskiego (np. ryby morskie czy sproszkowane glony z rodzaju *Laminaria*), aby zapobiec schorzeniom tarczycy. W czasach Hipokratesa (460–37 w p.n.e.) sproszkowane glony morskie czy pieczone (opalone) gąbki były nieodłącznym składnikiem ówczesnej diety ludzi, którzy mieli kłopoty z nadmiernym rozrostem gruczołu tarczycy. Jednak dopiero stosunkowo niedawno, gdyż na początku XIX wieku, w roku 1815 odkryto, że owa skuteczność stosowania produktów pochodzenia morskiego względem zapobieżenia powstawania wola było spowodowane obecnością jodu – pierwiastka odkrytego przez Courtoisa w 1811 roku [38].

Obecnie skutecznym sposobem profilaktyki schorzeń wynikających z niedoboru jodu w wielu krajach świata, w tym również w Polsce, jest jodowanie soli kuchennej.

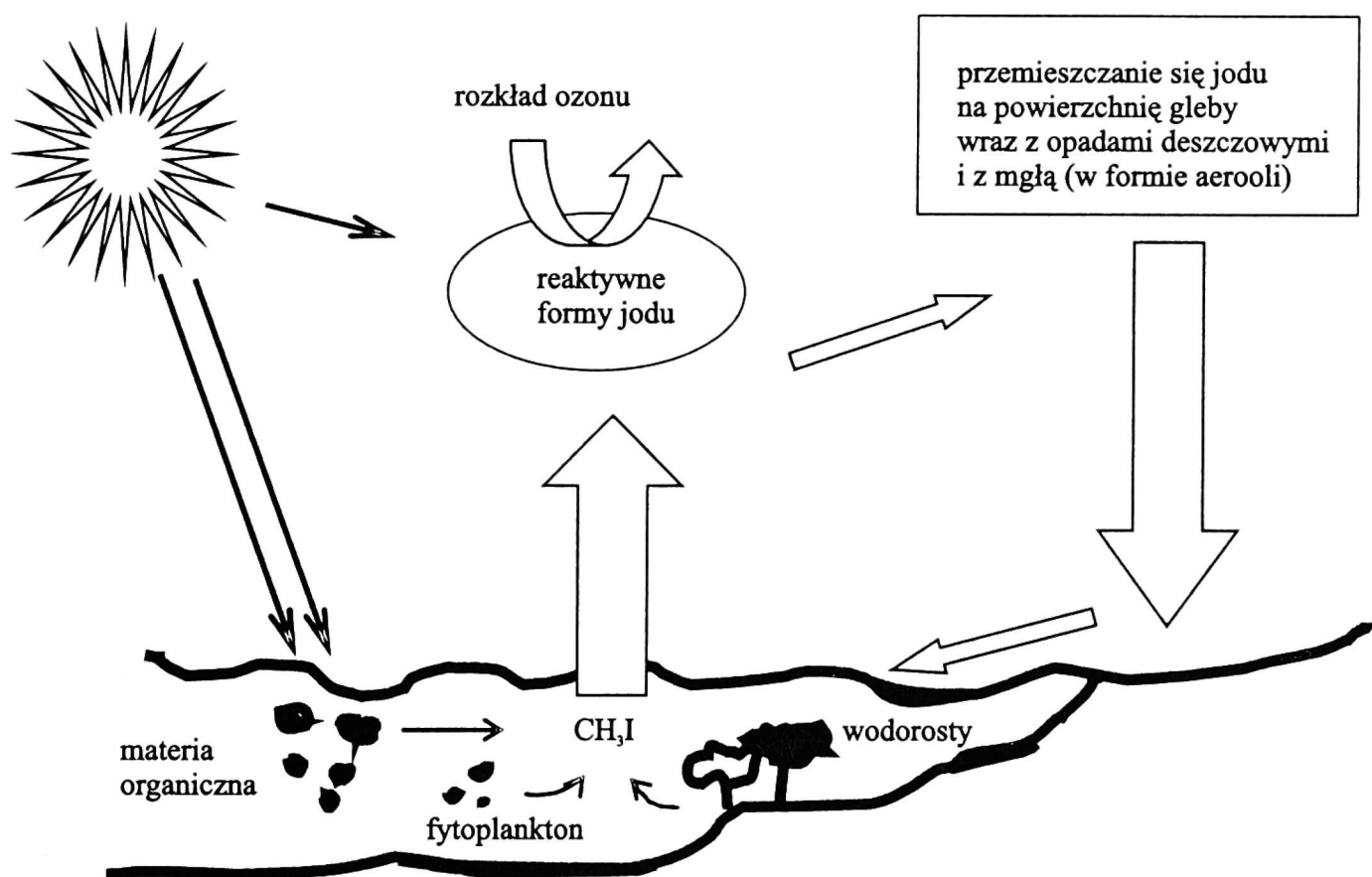
* W Słowniku Wyrazów Obcych brak jest dosłownego tłumaczenia tego pojęcia. Są jedynie słowa bio i fortyfikacja; co w języku polskim można rozumieć jako wzbogacenie, umocnienie (fortyfikacja) żywych organizmów (roślin) biodostępnymi mikroskładnikami (np. jodem i selenem), a więc można powiedzieć, że **biofortyfikacja** jest procesem polegającym na wytwarzaniu żywności, która jest bogata w biodostępne mikroskładniki, które po spożyciu przez człowieka mogą w sposób naturalny zredukować różnego rodzaju problemy zdrowotne występujące potencjalnie u milionów ludzi (np. brak jodu – IDD). Pojęcie to używane jest w piśmiennictwie angielskim.

Prawdopodobnie pierwszym, który zalecił użycie jodu w soli był Koestel, który w 1895 roku zaproponował stosowanie tej metody w Austrii [20]. W Polsce dopiero od roku 1996 wprowadzono model obowiązkowego jodowania soli kuchennej na poziomie $30 \pm 10 \text{ mg KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ soli [58]. Obecnie uważa się, że minimalna ilość jodu zapobiegająca powstawaniu wola tarczycy u człowieka wynosi $1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ masy ciała na dobę. Pogląd, że jod jest podstawowym i niezbędnym składnikiem białkowej cząsteczki syntetyzowanej przez gruczoł tarczycy zaczął nabierać kształtów tuż przed rokiem 1900. Około 1914 roku dr Kendall wyizolował krystaliczną tyroksynę z tkanki tarczycy, pod koniec lat trzydziestych zaś Harrington sformułował doświadczalną formułę dla tyroksyny oraz zaprezentował pogląd, że 40% całego jodu obecnego w gruczole tarczycy zawarte jest w hormonie głównym tarczycy – tyroksynie [38].

Głównym światowym źródłem jodu są złoża saletry chilijskiej ($0,2\text{--}0,4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), gdzie jod występuje głównie w postaci jodanu wapnia $\text{Ca}(\text{JO}_3)_2$. W Polsce wysoką zawartością jodu (do $150 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) charakteryzują się solanki z okolic Skoczowa [30]. Wydaje się, że najważniejszym źródłem jodu w atmosferze są morza i oceany. W wodzie morskiej zawartość jodu wynosi około $50 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$, co jest 10–100 razy wyższą zawartością niż w wodzie deszczowej [64]. Jod w wodzie morskiej występuje głównie w formie jonów nieorganicznych jako jon jodanowy (JO_3^-) lub w mniejszych ilościach jako jon jodkowy (J^-). Oba te jony na skutek fotochemicznej oksydacji, jak również przy udziale atmosferycznego ozonu oraz przy znacznym udziale fitoplanktonu i niektórych wodorostów morskich, ulegają przemianom do jodu pierwiastkowego [28].

Poza nieorganicznymi formami jodu w przyrodzie występuje wiele organicznych jego form, spośród których niektóre mogą być syntetyzowane przy udziale organizmów żywych. Takim procesem jest produkcja lotnego jodanu metylu będąca główną drogą przechodzenia jodu z mórz do atmosfery [36, 64]. Wydzielane przez niektóre glony morskie zwłaszcza z rodzaju *Laminaria* organiczne związki jodu (m.in. CH_3J) mogą pełnić ważną funkcję w zmianach klimatu na kuli ziemskiej. Niedawno brytyjscy uczeni [50, 37] odkryli, że lotne organiczne związki jodu wydzielane przez organizmy żywe (glony morskie) ulegają bardzo szybkiemu utlenieniu pod wpływem światła tworząc tlenki jodu, które mogą odgrywać bardzo istotną rolę w tworzeniu się źródeł aerozoli. Właśnie aerozole, w skład których wchodzi bardzo reaktywne rodniki halogenowe mogą powodować niszczenie warstwy ozonowej, co w konsekwencji może prowadzić do efektu cieplarnianego. W atmosferze chemiczne reakcje oksydacyjno-redukcyjne jodu mogą również prowadzić do powstawania jodanu metylu, a w konsekwencji do powstania jodu na różnych poziomach utlenienia. Przemieszczanie się jodu z mórz i oceanów nad powierzchnie lądowe stanowi podstawę światowego obiegu tego pierwiastka w przyrodzie [44]. Jod z opadami atmosferycznymi w formie areozoli, jak również w formie gazowej, przedostaje się na powierzchnię gleby i rośliny [rys. 1].

Na powierzchni rośliny jod może być osadzany w postaci tzw. depozytu mokrego (wet deposition – WT) lub depozytu suchego (dry deposition – DD). Depozyt suchy



Rysunek 1. Obieg jodu w przyrodzie; ukazuje główne źródła jodanu metylu uwalnianego z wody morskiej, przemieszczanie się jodu do powietrza, role jodu w destrukcji warstwy ozonowej oraz przemieszczanie się jodu znad oceanów nad powierzchnie lądowe (autor – Lucinda Spokes, na podstawie opracowania dr Alex Baker, Uniwersytet Norwich, Anglia)

jodu zależy do szybkości wiatru i turbulencji powietrza oraz od wilgotności rośliny i arealu powierzchni, na której ta roślina rośnie. Depozyt mokry jodu jest najczęściej osadzany w glebie. Względna zawartość jodu wstępnie deponowanego na powierzchni gleby będzie zależała od rodzaju roślin oraz od ich gęstości pokrycia gleby. Zrozumiałe jest, że najwięcej jodu jest zatrzymywane na obszarach gęsto pokrytych roślinnością. Całkowita zawartość jodu w glebie jest więc determinowana jego wkładem do gleby w postaci zarówno depozytu mokrego jak i depozytu suchego oraz zdolnością gleby do retencji jodu [7].

Jod może być dostarczony do środowiska również w postaci różnorodnych izotopów radioaktywnych, jak np. ^{129}J , ^{131}J , ^{133}J . Dostarczycielem tych izotopów mogą być różnorodne urządzenia nuklearne (np. elektrownie atomowe) lub składowane odpady paliwa jądrowego czy też pozostałości po katastrofach, czy wybuchach jądrowych. Izotopy jodu ^{131}J i ^{133}J są izotopami, których okres połowicznego rozpadu jest dość krótki (8,02 dnia i 20,8 godz.) w związku z tym obecność ich w środowisku jest krótkotrwała. Natomiast izotop jodu ^{129}J , z bardzo długim okresem połowicznego rozpadu wynoszącym $1,57 \times 10^7$ lat, jest nuklidem, którego poziom w środowisku nieustannie wzrasta. Ten właśnie nuklid, jak się sądzi, jest obecny w środowisku jako jod trwały i jest określany przez niektórych badaczy jako dawka trwałego jodu [39].

Pobieranie jodu przez rośliny i jego wpływ na ich wzrost i rozwój

Pobieranie jodu przez glony morskie, zwłaszcza z rodzaju *Laminaria*, odbywa się drogą dyfuzji w oparciu o reakcję utleniania jodu za pośrednictwem enzymu halo-peroksydazy [32]. Najnowsze badania wykazały, że jod odgrywa również jakąś, nie do końca jeszcze poznaną, specyficzną rolę podczas stresu oksydacyjnego rośliny, wywołanego np. zimnem, mniejszym naświetleniem rośliny, atakiem potencjalnych patogenicznych mikroorganizmów czy też podczas uszkodzenia mechanicznego. W badaniach nad zawartością jodu w populacji *Laminaria digitata* L. w różnych porach roku i w różnych częściach rośliny stwierdzono, że w trakcie pobierania jodu przez wodorosty powstają halogenowe związki węgla (co koreluje ze wzmożoną aktywnością haloperoksydazy), które mogą uczestniczyć w usuwaniu („zmiataniu”) produktów reaktywnych form tlenu powstałych na skutek stresu [5]. Uważa się, że właśnie reaktywne formy tlenu (RFT) mają swój niemały udział w patogenezie chorób cywilizacyjnych, gdyż zapoczątkowują liczne niekorzystne oksydacyjne zmiany w komórkach, co w konsekwencji może doprowadzić do zachwiania równowagi pomiędzy reakcjami wolnorodnikowymi i przeciwutleniającymi [59].

W porównaniu z ekosystemami morskimi posiadamy o wiele mniej informacji na temat ulatniania się i obiegu jodu w środowiskach lądowych. Uważa się, że jod w glebie zazwyczaj jest sorbowany przez komponenty glebowe, a następnie jest uwalniany do wody zawartej w glebie, gdy potencjał redukcyjny gleby obniża się istotnie [45]. Stwierdzono, że znaczna część jodu pochodzącego z gleby jest uwalniana do atmosfery w formie gazowej, np. jako CH_3J , co dało się zaobserwować w warunkach nawadniania pól ryżowych [42, 51]. Niektóre rośliny lądowe [52] oraz niektóre gatunki grzybów powodujących gnicie i rozkład drewna [24], mają zdolność syntetyzowania jodu w formie gazowej. W ostatnich latach odkryto, że niektóre bakterie (zarówno glebowe jak i morskie) są zdolne w warunkach oligotroficznym do procesu metylacji jodu do formy CH_3J . Stwierdzono, że reakcja metylacji jodu zachodzi przy udziale białkowego enzymu S-adenosylo-L-methioniny, który dostarcza grupy metylowej. Jednak do tej pory nie została wyjaśniona do końca funkcja mikroorganizmów glebowych w procesie produkcji lotnego jodanu metylu [2, 3].

Obecnie brak jest bezpośredniego dowodu na niezbędność jodu na wzrost i rozwój roślin. Jednak już na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku zauważono, że niskie stężenie jodu w środowisku wynoszące $0,02 - 0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wpływa korzystnie na wzrost i rozwój wielu gatunków roślin, jak np. halofitów [12, 13]. Od tego czasu, przez ponad 40 lat próbowano odpowiedzieć sobie na pytania: dlaczego i w jaki sposób rośliny pobierają jod ze środowiska oraz jaki to ma bezpośredni związek z biochemiczną funkcją jodu w roślinie w połączeniu z różnorodnymi reakcjami zachodzącymi w systemie gleba-roślina.

W środowisku glebowym, w obecności tlenu, jod jest silnie sorbowany przez materię organiczną i przez mikroorganizmy obecne w glebie. Jednakże, gdy środowisko glebowe jest beztlenowe (np. przy nawadnianiu pól ryżowych) jod może ulegać niewielkiej desorpcji w postaci CH_3J . Można więc sądzić, że metylacja jodu ma podłoże biologiczne i dlatego jod z gleby może ulatniać się również w warunkach beztlenowych, chociaż produkcja CH_3J ma miejsce głównie jako rezultat działalności tlenowych bakterii glebowych. Prawdopodobnie metylacja jodu preferencyjnie pojawia się zarówno w warunkach tlenowych jak i beztlenowych, gdzie niektóre frakcje jodu mogą być dostępne dla bakterii tlenowych w procesie metylacji. Ponadto jod jest metylowany w ryzosferze korzeni roślin, gdzie różnorodne substancje, które podtrzymują wzrost bakterii (jak tlen, cukry czy aminokwasy) są wydzielane właśnie przez korzenie roślin [3]. Saini i in. [52] w swojej pracy wskazują, że 87 spośród 118 badanych gatunków roślin miało metaboliczną możliwość syntetyzowania jodanu metylu, a spośród nich kapusta czerwona wykazała najwyższy stopień emisji CH_3J .

Pobieranie jodu przez rośliny lądowe może zachodzić poprzez korzenie (z roztworu glebowego) lub przez inne części roślin (np. liście) bezpośrednio z atmosfery. Fakt, że rośliny mogą pobierać formę gazową jodu głównie poprzez aparaty szparkowe oznacza, że warunki pogodowe są jednym z głównych czynników warunkujących to pobieranie (gdy aparaty szparkowe są otwarte pobieranie jodu się zwiększa). Udowodniono, że 60% jodu pobieranego przez rośliny zależy od wielkości rozwarcia aparatów szparkowych, pozostałe 40% zaś wiąże się z sorpcją głównie poprzez korzenie [7]. Altmok i in. [1] w badaniach na lucernie (*Medicago sativa* L.) udowodnili, że nawożenie dolistne jodem jest bardziej efektywne niż doglebowe, co wskazuje na fakt, że rośliny mogą pobierać jod bezpośrednio z atmosfery.

Rośliny mogą również pobierać jod radioaktywny ze środowiska. Pobieranie izotopów radioaktywnego jodu z gleby przez rośliny w przeważającej ilości wypadków jest opisywane w literaturze jako współczynnik przenoszenia (TF – transfer faktor) i jest definiowane jako stężenie radionuklidu jodu w roślinie w trakcie jej wzrostu do jego stężenia w glebie, które wyraża się w $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ suchej lub świeżej masy. Współczynnik TF zależy od gatunku rośliny, rodzaju gleby, chemicznych form jodu obecnych w glebie oraz od czynników klimatycznych. U roślin wartość TF dla jodu jest zawarta w przedziale od 0,001 do 1,5; u traw wynosi 0,034, dla ryżu 0,002 [48], a dla większości nasion zbóż wynosi średnio 0,0016 [54]. Ogólnie uważa się, że gleby z dużą zawartością materii organicznej wiążą jod utrzymując go w środowisku [8, 49]. Jednak badania Muramatsu i in. [40] pokazały, że na zatrzymanie jodu w glebie może wpływać również na pH gleby oraz obecność w glebie żelaza czy tlenków glinu. Inni badacze, jak np. Shinonaga i in. [54], uważają jednak, że pH gleby odgrywa raczej mniej istotną rolę w wyjaśnieniu przyczyn intensywnego zmniejszenia się zawartości jodu w glebie na skutek wymywania.

Jod w środowisku glebowym występuje głównie w formie jodanów lub jodków. W profilu glebowym największy poziom jodu daje się zauważyć w wyższych

warstwach, gdzie również zawartość materii organicznej jest największa. Dlatego zrozumiałym jest fakt, że najwięcej tego pierwiastka jest w torfie. Uważa się, że w zatrzymaniu jodu w glebie pośredniczą reakcje wiązania tego pierwiastka z tiolami czy polifenoalnymi obecnymi w materii organicznej [7, 64], które mogą wyzwać zarówno reakcje oksydacyjno-redukcyjne jak i wolno rodnikowe [27]. Jednak nie jest wciąż do końca wyjaśnione czy jod obecny w glebie jest pobierany przez organizmy glebowe czy też te organizmy wydzielają do gleby enzymy, które powodują w jakiś sposób zatrzymanie w niej tego pierwiastka. Najbardziej prawdopodobną interpretację tego zjawiska dały badania Borsa i Martensa [11], które wykazały, że proces wiązania jodu zachodzi głównie wewnątrz komórek mikroorganizmów glebowych. Podobne zależności przedstawiają też Letunova i in. [33], którzy sugerują, że w miarę rozkładu mikroorganizmów glebowych jod w nich zawarty stopniowo jest uwalniany do środowiska glebowego, gdzie staje się dostępny dla roślin. Inną z możliwych interpretacji wiązania jodu w glebie może być porównanie go do procesu zachodzącego w gruczole tarczycy [18].

Do pierwszych lat XXI wieku badania nad pobieraniem jodu przez rośliny prowadzono głównie pod kątem pobierania tego pierwiastka przez korzenie roślin, np. ryżu czy niektórych warzyw [41, 43, 47] i dlatego uzyskiwane dane odnosiły się właściwie do określonych plonów. Dopiero Ban-nai i Muramatsu [9], jako jedni z pierwszych, spróbowali dać odpowiedź na pytanie, w jaki sposób jod przemieszcza się w różnych częściach badanych organów roślinnych, w jaki sposób i dlaczego jest w nich akumulowany oraz jaki ma to bezpośredni związek z fizjologią rośliny. Prowadząc swoje badania zauważyli oni, że w miarę wsiąkania wody w glebę pojawia się w niej wiele tlenowych mikroorganizmów glebowych, które szybko zużywają tlen i zawartą w niej materię organiczną. Rezultatem tego warunki w glebie stają się beztlenowe. W tych warunkach następuje adsorpcja jodu w glebie, który następnie jest z niej desorbowany do roztworu glebowego jako jon jodkowy. Wówczas dopiero jod staje się dostępny dla roślin, które szybko ten jod adsorbują (ryż – *Oryza sativa* L, kropidło wodne zwane wodnym selerem – *Oenanthe javanica* (BLUME) DC). W warunkach gdy gleba nie zawiera dostatecznej ilości wody (jest stosunkowo sucha) jod jest mocno wiązany przez cząsteczki gleby i z trudem jest pobierany przez roślinę. Jod z gleby o dostatecznej zawartości wody pobierany jest przez korzenie roślin, a następnie transportowany do liści, gdzie jest akumulowany. U roślin bulwiastych, (np. rzepa – *Raphanus sativus* L.), u których w pierwotnej budowie anatomicznej istnieje wyraźna granica pomiędzy korą a stelą wykazano, że stele zawierają więcej jodu niż kora. Udowodniono, że właśnie jod wspólnie ze składnikami odżywczymi i wodą jest absorbowany najpierw przez komórki epidermalne korzeni, a następnie przechodzi przez korę i jest gromadzony w stelach, by w końcu przemieścić się do liści, gdzie jest akumulowany. W badaniach nad sałata (*Lactuca sativa* L.) stwierdzono, że najwięcej jodu było akumulowanego w liściach najstarszych, a więc zewnętrznych, obecność zaś jodu w liściach młodych była niewielka. Jednak co ciekawe, w liściach części środkowej (a więc

bardzo młodych) zawartość jodu była również wysoka. Fakt ten można wytłumaczyć podobieństwem przemieszczania się jodu w roślinie do przemieszczania się chloru, którego dystrybucja w roślinach ryżu najpierw zaczyna się od najbardziej wewnętrznych młodych liści, a dopiero potem obejmuje liście starsze [9].

W wypadku cebul czy bulw, o zmniejszonej zawartości jodu w tych organach decyduje przede wszystkim fakt, że są to organy przechowalnicze, gdzie proporcja zgromadzonych substancji organicznych, takich jak białka czy węglowodany, jest wysoka w stosunku do substancji nieorganicznych – jak np. popiół. Uważa się, że im niższa procentowa zawartość popiołu u roślin, tym stwierdza się mniejszą akumulację jodu z powodu efektu rozcieńczenia. Sheppard i in. [53] oraz Ban-nai i Muramatsu [9] stwierdzili, że zawartość jodu w liściach badanych roślin jest wysoka. Analizując zawartość jodu w liściach rzepy (*Brassica campestris* L.) i rzepaku (*Brassica rapa* var. *pervidis* L.) stwierdzili, że gromadzenie jodu w liściach zachodzi podobnie jak w przypadku sałaty (*Lactuca sativa* L.).

W przypadku warzyw, u których jadalnymi częściami są owoce – jak np. bakłażan (*Solanum melongena* L.) czy pomidor (*Solanum lycopersicum* L.) – współczynnik przenoszenia (TF) okazał się niższy niż w przypadku warzyw liściowych. Jednak w liściach tych warzyw stwierdzono wyższą zawartość jodu niż np. u sałaty (*Lactuca sativa* L.). W badaniach nad dystrybucją jodu w przypadku poszczególnych części owocu bakłażana (*Solanum melongena* L.) stwierdzono, że najwięcej tego pierwiastka było akumulowane najbliżej kielicha, a więc anatomicznie starszej części rośliny, niż bliżej wierzchołka owocu. Wydaje się, że ta tendencja koreluje z transportem jodu z wodą z korzeni przez system naczyniowy rośliny, a w konsekwencji z akumulacją jodu w liściach starszych [9].

W ziarnach zbóż (np. w pszenicy – *Triticum aestivum* L. czy w ryżu – *Oryza sativa* L.) stwierdza się generalnie mniejszą zawartość jodu niż w innych roślinach. W uprawie ryżu, w warunkach nawadniania pól ryżowych (podobnie jak w przypadku wodnego selera – *Oenanthe javanica* (Blume) DC) jod najpierw jest adsorbowany w glebie, a dopiero potem, w warunkach wysokiej wilgotności, jest desorbowany, powodując wyższe jego wykorzystanie przez rośliny ryżu [41].

Zawartość jodu i ich rozmieszczenie w roślinach

Wśród roślin najwięcej jodu zawierają glony morskie i sinice (listownica – *Laminaria* sp. L., spirulina – *Spirulina* sp. L., krasnorosty – *Rhodophyta*, morskocyn – *Fucus* sp. L.), porosty (płucnica – *Cetraria* sp. L., chrobotki – *Cladonia* sp. L.), rzeżucha – *Lepidium sativum* L., przytulia – *Galium* sp. L., czosnek – *Allium sativum* L., szpinak – *Spinacia oleracea* L., oraz zioła jak bylica estragon – *Artemisia dracuncululus* L., czy dziki bez czarny – *Sambucus nigra* L. Spośród produktów spożywczych pochodzenia

roślinnego bogate w ten pierwiastek są ziemniaki, szparagi, marchew, bób, ryż, płatki owsiane czy cebula.

Kapil i Singh [31] podają, że zawartość jodu w różnych produktach żywnościowych pochodzenia roślinnego na terenie Indii zależy od regionu i rodzaju rośliny. Stwierdzili oni, że największą zawartością jodu charakteryzowały się orzechy i nasiona roślin oleistych ($35\text{--}54 \mu\text{g} \cdot 100 \text{g}^{-1}$ s.m.), podczas gdy owoce i warzywa zawierały najniższą zawartość tego pierwiastka utrzymującą się na poziomie $2,7\text{--}20 \mu\text{g} \cdot 100 \text{g}^{-1}$ s.m. Anke i in. [4] wykazali, że średnia zawartość badanego pierwiastka w trawach pochodzących z terenów Niemiec i w zielonce z kukurydzy na kiszonkę wynosiła odpowiednio: $59 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., oraz $66 \pm 25 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Badania Heinricha i Wenka [25] wykazały, że zawartość jodu w zielonkach z traw i roślin motylkowatych kształtuje się na poziomie od 49 do $66 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., natomiast według Georgiewskiego i in. [22] zawartość tego pierwiastka w trawie pastwiskowej, koniczynie czerwonej, lucernie siewnej oraz mieszance wyki z owsem utrzymuje się w granicach od 40 do $70 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Badania prowadzone na kukurydzy w Indiach [10] wykazały, że zawartość jodu w tej roślinie zmieniała się w zależności od kolejnych faz rozwojowych od 46 do $19 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., w zielonce owsa zaś od 20 do $30 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Natomiast Drebcikas [19] podaje, że na Litwie zawartość jodu w roślinach zielonych przeznaczonych na paszę dla bydła mieści się w przedziale od 35 do $173 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Wartości te są bardzo zbliżone do koncentracji jodu uzyskanej w badaniach Brzóski i in. [14] oraz Strzetelskiego i in. [56], a dotyczących traw, koniczyn i zielonki z kukurydzy na kiszonkę ($48\text{--}170 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.). Wyniki te wskazują, że zawartość jodu w roślinach pastewnych i nasionach zbóż uprawianych w Polsce zależy od gatunku, warunków środowiskowych panujących w danym roku oraz od typu gleby, na której rośliny są uprawiane. Autorzy stwierdzili, że średnia zawartość jodu w roślinach pastewnych w Polsce wynosi $113 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. i waha się w granicach od 48 do $170 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., zawartość jodu zaś w ziarnach zbóż wynosi średnio $49 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. i mieści się w granicach od 25 do $103 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.

Yuita [65] podaje, że średnia światowa zawartość jodu w roślinach lądowych wynosi $0,42 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. W specyficznych warunkach zawartość jodu może być mierzona na poziomie: $0,6\text{--}2,6 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ u buraka – *Beta vulgaris* L., $0,1\text{--}2,4 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w kapuście – *Brasica oleracea* L. [53], w sianie zaś może osiągnąć wartość $0,08 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ s.w.m. [60].

Wesołowski i in. [63] w swoich badaniach nad zawartością i rozmieszczeniem jodu i boru w różnych częściach anatomicznych ziół stwierdzili, że określając zawartość tych pierwiastków w roślinie i odpowiednio do niej regulując ich stężenie w glebie można wpływać na prawidłowy wzrost i rozwój roślin, co w konsekwencji może doprowadzić do znacznego wzrostu plonu. Udowodnili oni, że zawartość jodu reprezentuje różny poziom, zależny od części anatomicznej rośliny (liście, korzenie, owoce, kwiatostany, koszyczki, kłaczka) i że więcej jodu zawierają liście badanych ziół,

a mniej korzenie. Porównując średnią zawartość jodu w badanych ziołach, liściach i korzeniach stwierdzono, że najczęściej tego pierwiastka zawierały liście babki lancetowatej – *Plantago lanceolata* L. (ok. $16 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ s.m.), a najmniej korzenie kozłka lekarskiego (*Valeriana officinalis* L.).

Muramatsu i in. [46] udowodnili, że współczynnik przemieszczania się jodu z gleby do rośliny, różni się znacznie pomiędzy uprawianymi gatunkami roślin (od niskich wartości dla pomidora – *Solanum lycopersicum* L., wyższych dla ryżu – *Oryza sativa* L., do wysokich dla brokuła – *Brassica oleracea* var. *botrytis* subvar. *cymosa* L.). Odnotowano również następujący malejący porządek w gromadzeniu jodu w poszczególnych częściach badanych roślin: – od liści starszych poprzez młodsze do owoców i ziaren, co wskazuje na niskie przemieszczanie się jodu z liści do innych organów roślinnych. Podobne wyniki w badaniach nad przemieszczaniem się jodu w systemie gleba–roślina uzyskali Sheppard i in. [53]. Inni badacze jak Asperer i Lansangan [6] zauważyli, że warzywa liściowe pobierają więcej jodu niż warzywa korzeniowe, Anke i in. [4] zaś udowodnili, że zawartość jodu przeważnie jest wyższa w liściach niż w nasionach. To przesądza o fakcie, że właśnie warzywa liściowe (jak np. szpinak – *Spinacia oleracea* L.) gromadzą wyższe zawartości jodu niż warzywa korzeniowe czy zboża. Rezultaty przeprowadzonych przez Fordyce [21] badań pokazują, że właśnie zboża (jak np. pszenica – *Triticum aestivum* L., owies – *Avena sativa* L., żyto – *Secale cereale* L., czy ryż – *Oryza sativa* L.) oraz różnego rodzaju produkty pochodzenia mącznego (w tym również i chleb) wykazują bardzo niską zawartość jodu. Wyjątkiem jest kukurydza (*Zea mays* L.), u której stwierdzono podobną zawartość jodu jak w przeciętnym mleku krowim ($92,6 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Przemieszczanie się jodu z organów wegetatywnych do generatywnych (ziaren) wymaga aktywnego transportu jodu floemem. Ostatnie badania przeprowadzone przez Maćkowiaka i Grossyla [35] wykazały, że jod pobierany przez rośliny ryżu jest w przeważającej większości gromadzony w korzeniach, łodygach i liściach, ilość zaś jodu przemieszczana do ziaren jest wyjątkowo mała. Wskazuje to na fakt, że właśnie transport jodu floemem jest wyjątkowo niski [26].

Biofortyfikacja warzyw jodem

Uzupełnianie śladowych pierwiastków w łańcuchu pokarmowym poprzez pobieranie ich przez rośliny ogólnie jest określane terminem biofortyfikacji i jak się uznaje jest jednym z mniej kosztownych, a zarazem skutecznych sposobów prowadzących do poprawy żywienia człowieka poprzez uzupełnienie niedoborów jodu lokalnie na terenach deficytowych w ten pierwiastek [29]. Obecnie biofortyfikacja rozwija się w kierunku takiego użycia mikroelementów (np. Se, J, Zn, Fe) by wyjaśnić ich wzajemne interakcje i zależności w celu optymalnego wykorzystania ich w różnorodnych programach biofortyfikacyjnych [23].

Ostatnio w Chinach w prowincji Xinjiang podjęto próbę zmniejszenia deficytu jodu w łańcuchu pokarmowym człowieka poprzez nawadnianie pól ryżowych jodowaną wodą [15]. Te długotrwałe zabiegi udowodniły, że konieczne jest takie właśnie podejście w celu zmniejszenia deficytu jodu w powiązaniu z lokalnymi problemami zdrowotnymi. Jednakże równocześnie zostało dowiedzione, że jod nie jest łatwo akumulowany w nasionach roślin zbożowych, takich właśnie jak ryż czy pszenica, gdyż jest on stosunkowo mało mobilny (a właściwie nie przemieszcza się) we floemie. Warzywa natomiast, zwłaszcza liściowe, powinny być wzięte pod uwagę pod kątem korzyści w gromadzeniu jodu, ponieważ akumulacja jodu w jadalnych częściach roślin, zwłaszcza liściach jest w dużym stopniu zależna od transportu ksylemem. Udowodniły to badania Zhu i in. [66] nad pobieraniem jodu z roztworu prowadzone na szpinaku (*Spinacia oleracea* L.). Wykazali oni, że zawartość jodu w liściach szpinaka wynosząca około $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ jest wystarczająca aby uzupełnić niedobór tego pierwiastka u człowieka.

W najnowszych badaniach przeprowadzonych przez badaczy chińskich [16, 17] zaobserwowano, że różne gatunki roślin różnie reagują na wzrost stężenia jodu w glebie zależnie od rodzaju i wielkości dawki oraz od rodzaju gleby. Niemniej jednak nie zaobserwowano żadnego korzystnego efektu związanego ze wzrostem badanych warzyw (szpinak – *Spinacia oleracea* L., kapusta chińska – *Brassica chinensis* L., cebula – *Allium cepa* L., wilec wodny zwany wodnym szpinakiem – *Ipomoea aquatica* FORSK., seller – *Apium graveolens* L., marchew – *Daucus carota* var. *sativus* DC.) wskutek nawożenia jodem, dla niektórych zaś roślin dodatek jodu powyżej $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powodował zmniejszenie plonu. Należy zauważyć, że jeśli dodatek jodu do gleby jest stosowany w celu biofortyfikacji plonu warzyw, to powinno się unikać nadmiernego dodatku tego pierwiastka do gleby w celu utrzymania odpowiedniego plonu roślin.

Zdolność gromadzenia jodu jest różna u różnych gatunków warzyw, spośród których właściwie tylko szpinak może być wzięty pod uwagę jako warzywo stosunkowo skuteczne dla biofortyfikacji jodem. Uczeni zalecają dodatek $1 \text{ mg J} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby jako wystarczający w celu osiągnięcia efektu biofortyfikacji plonu warzyw tym pierwiastkiem. Jednak by osiągnąć oczekiwany efekt należałoby uwzględnić również rodzaj gleby na której rosną rośliny. W ostatnich latach podjęto również próbę przeprowadzenia podwójnej suplementacji roślin szpinaka jodem i selenem [67]. Stwierdzono, że zabiegi te mogą przynieść pozytywne efekty w żywieniu człowieka w terenach deficytowych w te pierwiastki. Ponieważ biofortyfikacja warzyw jodem poprzez stosowanie nawozów jodowych jest zagadnieniem stosunkowo nowym, istnieje pilna potrzeba dokładnego ustalenia odpowiedniego poziomu nawożenia jodowego, w powiązaniu z różnorodnymi warunkami środowiskowymi.

Alternatywne źródła zaopatrzenia człowieka w jod

Człowiek do swojego prawidłowego rozwoju potrzebuje 100–150 mg jodu na dzień, z czego 75–80% może pochodzić z warzyw [34]. Uważa się, że około biliona osób na świecie żyje w regionach, gdzie występuje znaczny niedobór jodu w środowisku. Do tej pory jedną z najbardziej powszechnych i zarazem skutecznych metod zapobiegania chorobom wynikającym z niedoboru jodu (IDD) było jodowanie soli kuchennej. Jednakże jod obecny w soli w znacznej części ulega ulatnianiu podczas różnorodnych procesów produkcyjnych, np. gotowania, i dlatego właśnie bardzo trudno jest kontrolować efektywną koncentrację tego pierwiastka w soli [61]. Poza tym w ostatnich latach lekarzy endokrynologów zaniepokoił fakt ciągłego zwiększania się częstotliwości występowania schorzeń układu krążenia i nadciśnienia tętniczego. W profilaktyce tych schorzeń niezbędne jest unikanie diety solnej, co wiąże się z eliminacją soli kuchennej z pożywienia. Przewiduje się, że wdrożenie narodowego programu zwalczania tych schorzeń spowoduje spadek konsumpcji soli z około 10 g dziennie na osobę nawet o 30%, a tym samym pogorszy zaopatrzenie ludności w jod. Stąd za istotne uznano prowadzenie badań w kierunku zwiększenia zawartości jodu w produktach pochodzenia zwierzęcego, a szczególnie w mleku [57]. W ostatnich latach takie właśnie badania przeprowadzone przez Strzetelskiego [55] wykazały, że pobranie przez krowy w okresie pastwiskowym mieszanki mineralnej zawierającej $0,4 \text{ g jodu} \cdot \text{kg}^{-1}$ w ilości 70–75 g dziennie pozwala na uzyskanie zawartości jodu w mleku na poziomie $185 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, co można uznać za wystarczające dla potrzeb człowieka.

Jako alternatywne źródło zaopatrzenia w jod ludzi i zwierząt żyjących na terenach deficytowych w ten pierwiastek podejmuje się również starania w celu zwiększenia zawartości jodu w produktach pochodzenia roślinnego. Jopke i in. [29] w swoich badaniach nad zawartością jodu w roślinach i glebie na terenie Niemiec (które są uważane za rejon deficytowy w jod), wykazali bardzo bliską korelację pomiędzy dodatkiem jodu do gleby w formie naturalnego nawozu Calicha a koncentracją tego pierwiastka w roślinach rzeżuchy (*Lapidium sativum* L.) wynoszącą $30 \text{ mg jodu} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. W ostatnich latach uczeni chińscy [61], aby „wzmocnić” zawartość jodu w roślinach, podjęli próbę wzbogacenia środowiska deficytowego w jod poprzez dodatek naturalnego nawozu jodowego w formie mieszaniny sproszkowanych wodorostów z rodzaju *Laminaria* zawierającego znaczne ilości jodu z ziemią okrzemkową [62] i z diatomitem [61]. Badania te udowodniły, że warzywa rosnące w takim podłożu (pomidor, ogórek, bakłazan) charakteryzowały się dobrą akumulacją jodu zarówno w liściach jak i w owocach. Stwierdzono, że jod obecny w różnych częściach roślin jest nie tylko łatwiej przyswajalny przez organizm człowieka, ale może być lepiej zabezpieczony przed rozkładem (ulatnianiem się) w porównaniu z nieorganicznym jodem zawartym w soli kuchennej. Uważa się, że właśnie taka „jodowana zielona żywność” może spełniać funkcje ochrony zdrowia oraz zapobiegać i leczyć choroby (IDD) wywołane niedoborem jodu, a w niedalekiej przyszłości może stać się alternatywnym, tanim źródłem tego pierwiastka dla ludzi i zwierząt.

Zwiększenie zawartości jodu w roślinach może mieć duże znaczenie dla zdrowia człowieka. W niniejszej pracy podjęto próbę odpowiedzi na pytanie dlaczego i w jaki sposób rośliny pobierają jod ze środowiska oraz jaki to ma bezpośredni związek z biochemiczną funkcją jodu w roślinie w połączeniu z różnorodnymi reakcjami zachodzącymi w systemie gleba–roślina. Przedstawiono najnowsze badania dotyczące obiegu jodu w przyrodzie oraz jego wpływu na wzrost i rozwój roślin w systemie gleba–roślina, zarówno z punktu widzenia zagadnień dotyczących przemieszczenia się jodu w poszczególnych częściach roślin uprawnych (warzyw, owoców, ziół), jak i jego akumulacji w różnorodnych organach roślinnych. Wykazano, że podejmowane w ostatnich latach próby biofortyfikacji warzyw liściowych jodem poprzez ich nawożenie, budzą pewną nadzieję na zwiększenie zawartości tego pierwiastka w roślinach spożywanych przez człowieka i w niedalekiej przyszłości mogą stać się dodatkowym, ważnym jego źródłem dla ludzi i zwierząt obok jodowanej soli oraz mleka wzbogaconego w jod.

Literatura

- [1] Altmok S., Sozudogru-Ok S., Halilova H. 2003. Effect of iodine treatments on forage yields of alfalfa. *Com. Soil Sci. Plant Anal.* 34(1–2): 55–64.
- [2] Amachi S., Kamagata Y., Kanagawa T., Muramatsu Y. 2001. Bacteria mediate methylation of iodine in marine and terrestrial environments. *App. Environ. Microbiol.* 67(6): 2718–2722.
- [3] Amachi S., Kasahara M., Hanada S., Kamagata Y., Shinoyama H., Fujii T., Muramatsu Y. 2003. Microbial participation in iodine volatilization from soils. *Environ. Sci. Technol.* 37: 3885–3890.
- [4] Anke M., Groppe B., Scholz E. 1993. Iodine in the food chain. Proc. of the 8th Int. Symp. on „Trace elements in Man and Animals – TEMA 8”: 1049–1053.
- [5] Ar Gall E., Kupper F.C., Kloareg B. 2004. A survey of iodine content in *Laminaria digitata*. *Bot. Mar.* 47: 30–37.
- [6] Asperer G.A., Lansangan L.M. 1986. The uptake of I-131 in tropical crops. *Trace Subst. Environ. Health* 20: 457–465.
- [7] ATSDR – Agency of Toxic Substances and Disease Registry. 2004. Toxicological profile for iodine. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. pp 580. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp158.pdf>
- [8] Aubert H., Pinta M. 1977. Trace Elements in Soils. Elsevier Science Publishers, New York: 5–11.
- [9] Ban-nai T., Muramatsu Y. 2003. Transfer factors of radioiodine from volcanic-ash soil (andosol) to crops. *J. Radiat. Res.* 44: 23–30.
- [10] Bedi S.P.S. 1999. Influence of stage maturity/cutting on the iodine status of maize (*Zea mays* L.), oat (*Avena sativa* L.), and barseem (*Trifolium alexandrinum* L.). *Indian J. Anim. Sci.* 69(6): 428–429.

- [11] Bors J., Martens R. 1992. The contribution of microbial biomass to the adsorption of radioiodine in soils. *J. Environ. Radioact.* 15: 35–49.
- [12] Borst G.W., Pauwels F.H. 1961. Iodine as a micronutrient for plants. *Plant and Soil* 14: 665–671.
- [13] Borst G.W., Pauwels F.H. 1962. An investigation on the effects of iodide and iodate on plant growth. *Plant and Soil* 16 (3): 284–292.
- [14] Brzóska F., Szybiński Z., Strzetelski P. 2005. Iodine content of feeds and the possibility of increasing it in milk. *Med. Wet.* 61(2): 145–149.
- [15] Cao X.Y., Jiang X.M., Kareem A., Dou Z.H., Abdul Rakeman M., Zhang M.L., Ma T., O'Donnell K., DeLong N., DeLong G.R. 1994. Iodination of irrigation water as a method of supplying iodine to a severely iodine-deficient population in Xinjiang, China. *Lancet* 9(344): 107–110.
- [16] Dai J-L., Zhang M., Zhu Y-G. 2004. Adsorption and desorption of iodine by various Chinese soils. *I. Iodate. Env. Intern.* 30(4): 525–530.
- [17] Dai J-L., Zhu Y-G., Zhang M., Huang Y-Z. 2004. Selecting iodine-enriched vegetables and the residual effect of iodate application to soli. *Biol. Trace Elem. Res.* (Humana Press) 101(3): 265–276.
- [18] Dertinger H., Muller A., Nagel K., Riedl A., Strack S. 1986. Fixierung von radioaktivem Jod im Boden. KfK 3916.
- [19] Drebeckas V. 1993. Iodine status in Lithuania. Proc. of the 8th Int. Symp.: Trace elements in man and animals – TEMA 8: 1032–1035.
- [20] Eber O., Wawschinek O., Langsteger W., Lind P., Klima G., Petek W., Schubert B. 1990. Iodine supplementation in the province of Styria (in German). *Wien Med. Wochenschr.*, May 15, Vol. 140(9): 241–244.
- [21] Fordyce F.M. 2003. Database of the Iodine Content of Food and Diets Populated with Data from Published Literature. British Geological Survey Commissioned Report CR/03/84N: 50 ss.
- [22] Georgievskii V.I., Annenkov B.N., Samokhin V.T. 1981. Mineral nutrition of animals. Butterworths and Co. (Publishers) Ltd. Witham, Essex, London: 466 ss.
- [23] Graham H., James C.R., Robin R.D. 2004. Special article: Exploiting micronutrient interaction to optimize biofortification programs: The case for inclusion of selenium and iodine in the harvest plus program. *Nutrit. Rev.* 62(6): 247–252.
- [24] Harper D.B. 1985. Halomethane from halide ion—a highly efficient fungal conversion of environmental significance. *Nature* 315: 55–57.
- [25] Heinrich H., Wenk G. 1989. Der Jod Gehalt des bei Rind, Schaf und Schwein einsetzbaren Futters und Wassers im Bezirk Erfurt. W: 6th International Trace Element Symposium Vol. 3: 749–755.
- [26] Herret R.A., Hatfield Jr. H.H., Crosby D.G., Vlitos A.J. 1962. Leaf abscission induced by the iodine ion. *Plant Physiol.* 37: 358–363.
- [27] Huang T.S., Lu F.J. 1991. Iodine binding by humic acid. *Env. Toxicol. Chem.* 10:179–184.
- [28] Johanson K.J. 2000. Iodine in soil – Technical Report TR-00-21, Department of Forest Mycology and Pathology, The Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, December 2000, Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm Sweden: 45 ss.
- [29] Jopke P., Bahadir M., Fleckenstein J., Schung E. 1996. Iodine determination in plant materials. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 27 (3–4): 741–751.
- [30] Kabata-Pendias A., Pendias H. 1993. Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa: 364 ss.

- [31] Kapil U., Singh P. 2003. Status of iodine content of salt and urinary iodine excretion levels in India. *Pakistan J. Nutr.* 2(6): 361–373.
- [32] Küpper F.C., Schweigert N., Ar Gall E., Legendre J.M., Vilter H., Kloareg B. 1998. Iodine uptake in Laminariales involves extracellular, haloperoxidase-mediated oxidation of iodide. *Planta* 207(2): 163–171.
- [33] Letunova S.V., Korobova E.M., Aleksieyeva S.A. 1987. Iodine concentration in soil microorganisms. W: Arbeitstagung Mengen – und Spuren Elemente. Red.: M. Anke, K.-Marx Universität, Leipzig: 11–14.
- [34] Liao Z.J. 1992. Environmental chemistry of trace element and biochemical effect. Beijing, Chinese Env. Sci. Press: 50–52, 56.
- [35] Maćkowiak C.L., Grossl P.R. 1999. Iodate and iodine effect on iodine uptake and partitioning (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture. *Plant Soil* 212(2): 135–143
- [36] Mason B., Moore C.B. 1982. Principles of geochemistry. 4th edition. John Wiley & Sons, New York.
- [37] McFiggans G. 2005. Atmospheric science: marine aerosols and iodine emissions. *Nature* 10(433): E13; discussion E13-4.
- [38] MTDA – Mineral Tolerance of Domestic Animals. 1980, National Academy of Science, Washington DC: 577 ss.
- [39] Muramatsu Y., Ohmomo Y., 1986. Iodine-129 and iodine-127 in environmental samples collected from Tokoimura/ibaraki, Japan. *Sci. Total Environ.* 48: 33–43.
- [40] Muramatsu Y., Uchida S., Sriyotha P., Sriyotha K. 1990. Some considerations on the sorption and desorption phenomena of iodide and iodate on soil. *Water Air Soil Pollut.* 49: 125–138.
- [41] Muramatsu Y., Uchida S., Sumiya M., Ohmomo Y. 1989. Tracer experiments on transfer of radioiodine in the soil-rice plant system. (in Japanese). *Radioisot.* 45: 157–171.
- [42] Muramatsu Y., Yoshida S. 1995. Volatilization of methyl iodide from the soil-plant system. *Atmos. Environ.* 29(1): 21–25.
- [43] Muramatsu Y., Yoshida S., Ban-nai T. 1995. Tracer experiments on the behavior of radioiodine in the soil-plant-atmosphere system. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.* 114: 303–310.
- [44] Muramatsu Y., Yoshida S., Fehn U., Amachi S., Ohmomo Y. 2004. Studies with natural and anthropogenic iodine isotopes: iodine distribution and cycling in the global environment. *J. Environ. Radioact.* 74(1–3): 221–232.
- [45] Muramatsu Y., Yoshida S., Uchida S., Hasebe A. 1996. Iodine desorption from rice paddy soil. *Water Air Soil Pollut.* 86: 359–371.
- [46] Muramatsu Y., Uchida S., Sumiya M., Ohmomo Y. 1985. Iodine separation procedure for the determination of ^{129}I and ^{127}I in soil by neutron activation analysis. *J. Radioanalyt. Nucl. Chem.* 94: 329–338.
- [47] Muramatsu Y., Yoshida S., Ban-nai T., Amachi S. 2002. Behavior of iodine in the soil-plant system. *Radioprot.* 37 C1: 479–484.
- [48] Ng Y.C. 1982. A review of transfer factors for assessing the dose from radionuclides in agricultural products. *Nucl. Safety* 23: 57–71.
- [49] Norrish K. 1975. Geochemistry and mineralogy of trace elements. W: Trace elements in soil-plant-animal systems. D.J.D. Nicholas, A.R. Egan (eds). Academic Press, Inc. N.Y.: 55–81 ss.
- [50] O'Dowd C.D., Jimenez J.L., Bahreini R., Flagan R.C., Seinfeld J.H., Hameri K., Pirjola L., Kulmala M., Jennings S.G., Hoffmann T. 2002. Marine aerosol formation from biogenic iodine emissions. *Nature* 6(417): 632–636.

- [51] Redeker K.R., Wang N.Y., Low J.C., McMillan A., Tyler S.C., Cicerone R.J. 2000. Emission of methyl halides and methane from rice paddies. *Science* 290: 966–969.
- [52] Saini H.S., Attieh J.M., Hanson A.D. 1995. Biosynthesis of halomethanes and methanethiol by higher plants via a novel methyltransferase reaction. *Plant Cell Environ.* 18: 1027–1033.
- [53] Sheppard S.C., Evanden G.W., Amiro B.D. 1993. Investigation of the soil-to-plant pathway for I, Br, Cl and F. *J. Environ. Radioact.* 21: 9–32.
- [54] Shinonaga T., Gerzabek M.H., Strebel F., Muramatsu Y. 2001. Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria. *Sci. Total Environ.* 227: 33–40.
- [55] Strzetelski P. 2003. Zawartość jodu w paszach oraz wpływ jego poziomu w dawce pokarmowej na skład mleka krów. Praca doktorska, Biblioteka Główna Instytutu Zootechniki, Balice–Kraków: 56 ss.
- [56] Strzetelski P., Brzóska F., Brzeziński W. 2005. Iodine content of green fodder and cereal crops in Poland. *Ann. Anim. Sci.* 5(1). 1711–80.
- [57] Szybiński Z. 2003. Streszczenie końcowego raportu (1999–2003) narodowego programu eliminacji niedoboru jodu i aktualny stan profilaktyki jodowej w Polsce. Kraków 17.12.2003 r. Polska Komisja ds. Kontroli Zaburzeń Niedoboru Jodu.
- [58] Szybiński Z., Lewiński A. 1996. Stanowisko Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Endokrynologicznego i Krajowego Zespołu Konsultanta Medycznego w dziedzinie endokrynologii w sprawie suplementacji jodem środków spożywczych. *Pol. J. Endoc.* 47: 96–97.
- [59] Troszyńska A., Honke J., Kozłowska H. 2000. Naturalne substancje nieodżywcze (NSN) pochodzenia roślinnego jako składniki żywności funkcjonalnej. *Post. Fitoter.* 2/2000. (<http://www.borgis.pl/czytelnia/pfindex.php>)
- [60] Voigt G., Henrichs K., Prohl G., et al. 1988. Measurements of transfer coefficients from ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{23}Na , ^{131}I and $^{95\text{m}}\text{Tc}$ from feed into milk and beef. *Radiat. Environ. Biophys.* 27: 143–152.
- [61] Weng H.X., Guo D.F., Zeng H.S. 1999. Amelioration of the biogeochemical environment with iodine in kelp. *J. Environ. Sci.* 11(4): 392–396.
- [62] Weng H.X., Weng J.K., Yong W.B., Sun X.W., Zhong H. 2003. Capacity and degree of iodine absorbed and enriched by vegetable from soil. *J. Environ. Sci. (China)*. 15(1):107–111.
- [63] Wesółowski M., Arceusz A., Rojek B. 2003. Iodine and boron in medicinal plant raw materials. Concentration and distribution in different anatomical parts of plants. (Jod i bor w roślinnych surowcach leczniczych. Zawartość i rozmieszczenie w różnych częściach anatomicznych roślin). *Herba Pol.* 49(3/4): 301–304.
- [64] Whitehead D.C. 1984. The distribution and transformations of iodine in the environment. *Environ. Int.* 10: 321–339.
- [65] Yuita K. 1994. Overview and dynamics of iodine and bromine in the environment: 1. Dynamics and iodine and bromine in soil-plant system. *JARQ* 28: 90–99.
- [66] Zhu Y., Huang Y., Hu Y., Liu Y. 2003. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations. *Environ. Int.* 29(1): 33–37.
- [67] Zhu Y., Huang Y., Hu Y., Liu Y., Christie P. 2004. Interactions between selenium and iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) in solution culture. *Plant and Soil* 261(1–2): 99–105(7).

Interdependence and interaction in iodine appearance in soil-plant system (review)

Key words: iodine, soil-plant system, vegetables, biofortification

Summary

Increasing of iodine content in plant tissue can be particularly important for human health. In the present study the authors tried to answer the question of iodine uptake by plants from the environment as well as to find the connection between biochemical function of iodine within plant tissue and various reactions in soil-plant system. Recent investigations concerning iodine circulation in environment and its effect on plant growth and development in soil-plant system were presented, resulted both from iodine translocation in particular parts of cultivated plants (vegetables, fruits, herbs) and its accumulation in various plant organs. It was stated that the recently undertaken trials of biofortification of leafy vegetables with iodine fertilization seem to be hopeful and can influence an increase of this element concentration in plant tissue. The edible parts of those plants can be, apart from salt and milk enriched with iodine, an essential source of iodine both, in human and animal nutrition.