

**Barbara Gworek\*, Joanna Rateńska\*\***

## **MIGRACJA RTĘCI W UKŁADZIE POWIETRZE – GLEBA – ROŚLINA**

### **MERCURY MIGRATION IN PATTERN AIR – SOIL – PLANT**

**Słowa kluczowe:** rtęć, migracja, powietrze, gleba, rośliny.

**Key words:** mercury, migration, air, soil, plants.

*This paper presents the problem of mercury compounds migration from natural and anthropogenic sources to environment. These compounds get to different elements of environment ie: air, soil and water and accumulate there. There is also the transfer of mercury and its compounds among different element of environment. These phenomena are defined as biogeochemical circulation of mercury in nature. The presence of this toxic element in the environment is the threat to living organisms eg. plants. This paper concentrates on problems connected with mercury migration from environment to plant tissues focusing on sources, transfer, pathways and Hg impact on plants its consequences.*

#### **1. WPROWADZENIE**

##### **1.1. Cel i zakres pracy**

W niniejszym opracowaniu poruszono problem migracji związków rtęci do środowiska zarówno ze źródeł naturalnych, jak i antropogenicznych. Związki te dostają się do różnych elementów środowiska, tj. do powietrza, gleby i wody, po czym mogą ulegać w nich kumulacji. Istnieje również przepływ rtęci i jej związków między poszczególnymi elementami środowiska. Wiele takich zjawisk określa się mianem biogeochemicznego obiegu rtęci w przyrodzie [Kabata-Pendias 1992]. Obecność tego toksycznego pierwiastka w środowisku sta-

---

\* *Prof. dr hab. Barbara Gworek – Instytut Ochrony Środowiska, ul. Krucza 5/11d, 00-548 Warszawa; tel.: 22 621 36 70; e-mail: barbara.gworek@ios.edu.pl oraz Katedra Nauk o Środowisku Glebowym, Wydział Rolnictwa i Biologii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa.*

\*\* *Joanna Rateńska – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa.*

nowi zagrożenie dla organizmów żywych, m.in. dla roślin wyższych. Niniejsze opracowanie poświęcono zatem zagadnieniom związanym z przedostawaniem się rtęci ze środowiska do tkanek roślin z uwzględnieniem źródeł, dróg przepływu oraz skutków oddziaływania Hg na omawiane organizmy.

## 1.2. Charakterystyka rtęci i jej związków

Rtęć to srebrzystobiały metal o silnym połysku. Jej gęstość wynosi  $13,55 \text{ g/cm}^3$  a masa molowa  $200,59 \text{ g/mol}$ . Jest jedynym pierwiastkiem metalicznym mającym ciekły stan skupienia w temperaturze pokojowej. Wrze w temperaturze  $629,7^\circ\text{K}$ , topi się zaś w  $234,3^\circ\text{K}$ .

Występuje na I lub II stopniu utlenienia i w zależności od tego może tworzyć różne związki z innymi pierwiastkami. Rtęć(I) tworzy szereg soli rtęciowych, zawierających złożony jon  $\text{Hg-Hg}^{2+}$ . Sole rtęci(II) zawierają jon  $\text{Hg}^{2+}$ . Przykładami pospolitych soli rtęciowych mogą być halogenki  $\text{Hg}_2\text{X}_2$ , czyli związki z fluorem, chlorem, bromem i jodem, siarczek  $\text{HgS}$  oraz sole tiocyjanianowe  $\text{Hg}(\text{SCN})_2$  [Szpadta 1994].

Rtęć jest pierwiastkiem bardzo szkodliwym, jednak jej toksyczność zależy od formy występowania w środowisku. Może występować w postaci płynnego metalu, rtęci związanej w naturalnych minerałach, lotnej rtęci w atmosferze ( $\text{Hg}^0$ ), a także w postaci jonów w środowisku wodnym i roztworze glebowym. Ogólny podział form rtęci według właściwości, to:

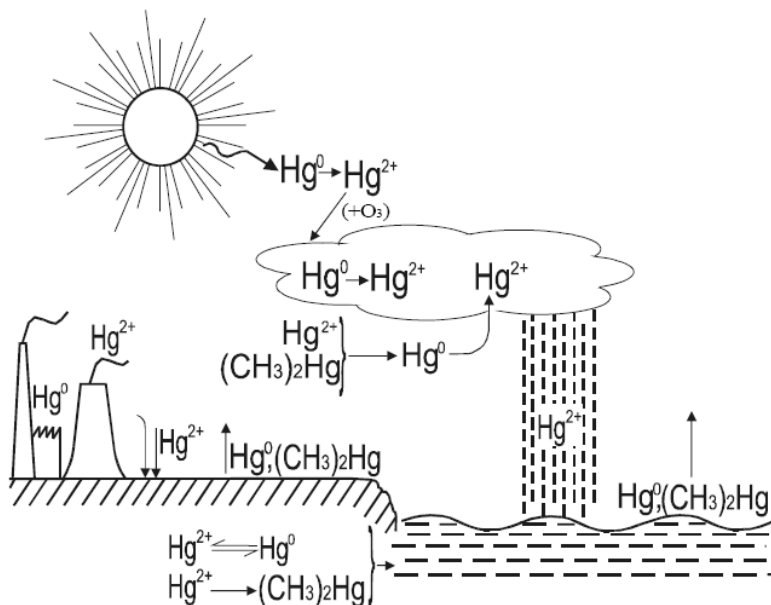
- łatwo lotne:  $\text{Hg}^0$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ,
- łatwo rozpuszczalne w wodzie,
- trudno rozpuszczalne w wodzie [Kabata-Pendias 1992].

Często spotykane są rozpuszczalne formy rtęci, takie jak:  $[\text{HgOH}]^+$ ,  $[\text{HgCl}]^+$ ,  $[\text{HgCl}_2]$ ,  $[\text{HgCl}_3]^-$ ,  $[\text{HgCl}]^{2-}$ ,  $[\text{HgS}_2]^{2-}$ . Ponadto rtęć może występować w rozpuszczalnych niejonowych związkach organicznych oraz innych związkach organicznych i nieorganicznych. Przykładami trudno rozpuszczalnych form rtęci mogą być:  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  lub  $\text{Hg}(\text{CN})_2$ . Rtęć związana w skorupie ziemskiej lub paliwach nie stanowi zagrożenia. Dopiero uwolniona staje się bardzo mobilna i trwale pozostaje w środowisku.

Możliwość przechodzenia rtęci w różne formy powoduje, że niezwykle łatwo jest przenoszona na dalekie odległości. Sprzyja temu również długi okres trwania Hg w powietrzu (360 lat). Jest jednym z pierwiastków śladowym o największym współczynniku kumulacji [Dąbkowska-Naskręt i in. 2008], czyli stosunku ilości metalu pozyskiwanego z naturalnych zasobów do jego ilości, na jaką istnieje zapotrzebowanie ze strony materii żywej [Hławiczka 2008].

## 1.3. Przemiany rtęci i jej związków w środowisku

Obieg rtęci w przyrodzie dotyczy każdego środowiska życia organizmów i w każdym z nich podlega różnego rodzaju przemianom (rys. 1).



**Rys.1.** Schemat transportu i transformacji rtęci w obiegu atmosferycznym [za Kabata-Pendias 1992]

**Fig. 1.** Scheme of mercury transport and transformation in atmospheric cycle [after Kabata-Pendias 1992]

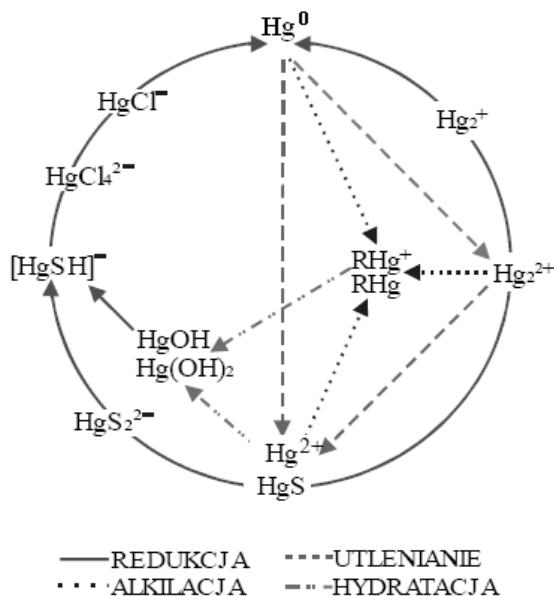
Przemiany te są bardzo istotne ze względu na różną toksyczność poszczególnych form rtęci i zachodzą zarówno w fazie ciekłej, jak i gazowej. W atmosferze dominuje rtęć  $\text{Hg}^0$  oraz dwumetylek rtęci  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ , które powstają pod wpływem promieniowania słonecznego (reakcje fotochemiczne) oraz w wyniku przemian biochemicznych. W atmosferze  $\text{Hg}^0$  utlenia się do postaci  $\text{Hg}^{2+}$ . Występują trzy główne typy reakcji powstawania  $\text{Hg}^{2+}$  w atmosferze:

- reakcja z ozonem:  $\text{Hg}^0 + \text{O}_3 \rightarrow \text{Hg}^{2+} + \text{inne produkty}$ ,
- reakcja z rodnikiem hydroksylowym  $\text{OH}^-$ :  $\text{Hg}^0 + \text{OH}^- \rightarrow \text{Hg}^{2+} + \text{inne produkty}$ ,
- reakcja z chlorem:  $\text{Hg}^0 + \text{Cl}_{2g} \rightarrow \text{HgCl}_{2g}$  [Hławiczka 2008].

Utleniaczami w reakcjach powstawania  $\text{Hg}^{2+}$  mogą być ponadto: tlen cząsteczkowy, dwutlenek azotu oraz rodniki, takie jak  $\text{H}_2\text{O}_2^*$  i  $\text{H}_2\text{O}^*$  [Wesołowski i in. 2003]. W formie jonu  $\text{Hg}^{2+}$  rtęć opada na powierzchnię Ziemi z opadami atmosferycznymi.

Mikroorganizmy, głównie bakterie i grzyby, biorą znaczny udział w przeobrażeniach związków rtęci, powodując, że jedne formy przechodzą w drugie, co w decydujący sposób wpływa na obieg rtęci w przyrodzie. Szczególnie istotne są procesy metylacji rtęci przez mikroorganizmy (np. bakterie *Pseudomonas* spp.) w środowisku glebowym i wodnym, ponieważ jedynie metylopo pochodne rtęci mogą być dostępne dla roślin. Metylortęć może powstawać w glebie również w wyniku metylacji chemicznej.

Rozmieszczenie związków rtęci w glebach zależy przede wszystkim od panujących w nich warunków oksydoredukcyjnych [Kabata-Pendias 1992]. Przemiany i związki rtęci w glebach ilustruje rysunek 2.



**Rys. 2.** Związki rtęci w glebie [za Kabata-Pendias 1992]

**Fig. 2.** Mercury compound in soil [after Kabata-Pendias 1992]

W glebach o przewadze warunków utleniających dominują formy  $Hg^{2+}$  i  $Hg_2^{2+}$ , w glebach o warunkach redukcyjnych występują głównie związki rtęci z siarką, w glebach o warunkach przejściowych natomiast najczęstsze są alkilowe (metylowe) związki rtęci.

## 2. ŹRÓDŁA EMISJI RTĘCI DO ŚRODOWISKA

### 2.1. Naturalne źródła rtęci w środowisku

Powszechnie uważa się, że rtęć i jej związki są zawsze obecne w środowisku naturalnym, stanowiąc tzw. tło rtęci. Wszelkie wartości stężeń wyższe od tła stanowią zanieczyszczenie środowiska [Wojnar, Wisz 2006].

Głównymi naturalnymi źródłami rtęci w środowisku są wybuchy wulkaniczne, wylewy podwodne, odparowanie rtęci z powierzchni lądów i oceanów oraz wietrzenie i erozja minerałów zawierających ten metal (złoża występują w różnego rodzaju skałach osadowych, w wierzchnich warstwach skorupy ziemskiej). Erozyjna działalność czynników

zewnątrznych jest najsilniejsza w poziomach przypowierzchniowych, w których rtęć występuje najczęściej. Te naturalne uwarunkowania sprzyjają szybkiemu i skutecznemu uwalnianiu rtęci do środowiska. Naturalnymi źródłami emisji rtęci do powietrza są ponadto procesy geotermiczne oraz wegetacja roślin.

## 2.2. Emisja przemysłowa rtęci i jej związków

Antropogeniczne emisje rtęci do środowiska są mniejsze od emisji naturalnych, jednak wokół miejsc lokalnej podwyższonej emisji rtęci antropogenicznej źródła naturalne mają znikome znaczenie. Globalna emisja rtęci ze wszystkich źródeł, zarówno naturalnych jak i antropogenicznych, wynosi ok. 4400–7500 ton rocznie [Wojnar, Wisz 2006].

Spalanie węgla jest jednym z podstawowych procesów zanieczyszczenia środowiska rtęcią, a wśród istniejących instalacji spalania węgla za dominujące w zanieczyszczeniu atmosfery uznaje się ciepłownictwo komunalne i indywidualne [Kiepas-Kokot i in. 2003].

Większość związków rtęci w węglu (65% do 70%) występuje w połączeniu z siarką, najczęściej pirytem. Rtęć występuje również z popiołem mineralnym i z frakcją organiczną w węglu, co stanowi pozostałe 30% do 35%.

Istotnym źródłem rtęci są zakłady przemysłowe przeprowadzające przestarzałe procesy technologiczne, a także nieprawidłowo zabezpieczone składowiska niektórych odpadów i zakłady ich unieszkodliwiania.

Zwiększone stężenia rtęci notowane są również wokół hut metali kolorowych, zakładów przemysłu papierniczego, chloro-sodowego i farmaceutycznego oraz produkcji lamp wyładowczych (rtęciowych), urządzeń pomiarowych (termometrów i manometrów rtęciowych), baterii i elementów uzbrojenia [Kabata-Pendias 1992].

Dawniej duże ilości rtęci dostawały się do środowiska w wyniku działalności rolniczej. Stosowano specjalne rtęciowe zaprawy nasienne, które chroniły nasiona przed chorobami powodowanymi przez grzyby. W późniejszym okresie zakazano jednak stosowania tych środków.

Jako przemysłowe źródła zanieczyszczenia rtęcią można wymienić także procesy otrzymywania cementu i wapna, rafinacji ropy naftowej, produkcji smoły i asfaltu oraz wytwarzanie koksu.

Rtęć stosowana jest także m.in. do produkcji farb ochronnych i amalgamatów dentystrycznych. Używana jest jako katalizator przy produkcji niektórych tworzyw sztucznych [Alloway, Ayres 1999]. W tabeli 1 przedstawiono ilość rtęci w wybranych odpadowych produktach zawierających ten metal.

**Tabela 1.** Ilość rtęci w strumieniu odpadów z produktów zużytych w krajach UE-25 w 2005 r. [Hławiczka 2008]

**Table 1.** Content of mercury in waste stream from a used products in UE-25 countries in 2005 year [Hławiczka 2008]

Rodzaj produktu	Masa [Mg]
Baterie	40
Materiały dentystyczne	72
Sprzęt pomiarowo-kontrolny	42
Urządzenia oświetleniowe	46
Urządzenia elektryczne i elektroniczne	42
Razem	242

Rtęć z emisji przemysłowych w większości dostaje się do powietrza atmosferycznego. W dalszej kolejności może się dostawać do wody i gleby w wyniku suchej i mokrej depozycji.

### 3. ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ RTĘCI W ŚRODOWISKU

#### 3.1. Sucha i mokra depozycja rtęci z atmosfery

Depozycja rtęci polega na opadaniu tego metalu z atmosfery na powierzchnię lądów, wód i na szatę roślinną, wraz z opadami deszczu i śniegu (depozycja mokra) oraz na osiadaniu w postaci związanej z cząstkami pyłu (depozycja sucha). Wszystkie te procesy przebiegają na całej powierzchni Ziemi w sposób w przybliżeniu równomierny. Zwiększona depozycja występuje na terenach sąsiadujących z wulkanami i w tych rejonach stwierdza się wyraźnie większe stężenia rtęci w glebie oraz w roślinach.

Wielkość depozycji rtęci zależy od lokalizacji emitorów, wielkości emisji, lokalnych warunków meteorologicznych (wielkości opadów i temperatury), rodzaju powierzchni oraz chemicznej formy rtęci ulegającej depozycji.

Poglądy dotyczące roli poszczególnych rodzajów depozycji na oczyszczanie atmosfery są podzielone. W literaturze można spotkać informacje, że naturalny proces oczyszczania atmosfery jest związany jedynie z mokrą depozycją lub że sucha depozycja ma dominujące znaczenie w usuwaniu rtęci z atmosfery. Tę sprzeczność poglądów opisuje w swojej publikacji Hławiczka [2008]. Sucha depozycja pozwala na usuwanie rtęci z atmosfery niezależnie od wielkości opadów.

Wiązanie rtęci atmosferycznej w kroplach wody odbywa się w dwóch lokalizacjach. Może się to odbywać wewnątrz chmury lub w kroplach pod chmurą. Wewnątrz chmury proces wiązania jest efektywniejszy ze względu na dłuższy czas kontaktu związku z kroplami wody. Proces wiązania Hg zależy w dużej mierze od ilości wody w danej chmurze. Najłatwiej do kropli przechodzi związek  $\text{HgCl}_2$  dzięki swojej dobrej rozpuszczalności.

Rtęć podlega nagromadzeniu w utworach o zwiększonych właściwościach sorpcyjnych, tzn. w skałach iłowcowych oraz w glebach gliniastych i torfowych. Przeciętnie jej zawartości w glebach mineralnych nie przekraczają 100 µg/kg, a w glebach torfowych 260 µg/kg s.m. Maksimum zawartości rtęci w tych glebach może wynieść 1100 µg/kg [Jędrzejczak 2000]. W glebach kwaśnych rtęć jest związana głównie z substancją organiczną i w formie rozpuszczalnych związków organicznych jest przeważnie transportowana do jezior [Kabata-Pendias 1992].

### 3.2. Przepływ i oddziaływanie rtęci w układzie gleba–roślina

**Zagrożenia dla roślin związane z obecnością rtęci w glebie.** Rtęć obok kadmu i ołowiu jest pierwiastkiem niemającym funkcji życiowych dla roślin, ale pomimo to dostaje się do ich tkanek. W tkankach roślinnych rtęć podlega silnemu wiązaniu przez grupy sulfhydrylowe białek [Wesołowski i in. 2003]. Może to stwarzać wiele zagrożeń dla tych organizmów, tj. powodować zaburzenie procesów oddychania komórkowego, w tym głównie przemian enzymatycznych.

Bardzo ważne jest stwierdzenie mobilności oraz biodostępności rtęci dla roślin, ponieważ zawartość form mobilnych w środowisku jest miarą rzeczywistego zagrożenia. Rtęć w glebach o odczynie od słabo kwaśnego do alkalicznego zostaje silnie związana z wielkocząsteczkowymi substancjami humusowymi [Dąbkowska-Naskręt i in. 2008] oraz z niskocząsteczkowymi, łatwo rozpuszczalnymi kwasami humusowymi. W tym pierwszym przypadku dostępność dla roślin warunkuje uwolnienie rtęci z istniejącego połączenia. Z kolei dzięki wiązaniu z dobrze rozpuszczalnymi związkami humusowymi rtęć może być łatwo pobierana przez organizmy roślinne.

Pobór rtęci przez rośliny odbywa się dwiema drogami:

- przez korzenie z gleby

oraz

- przez liście z atmosfery.

Przeważająca część zawartości omawianego metalu w roślinach pochodzi jednak z powietrza. Korzenie rośliny pobierają rtęć jednocześnie z innymi substancjami z gleby. Jeżeli zabraknie tych konkurencyjnych substancji, pobór rtęci jest odpowiednio większy [Dąbrowski 1992]. Rośliny wyższe są stosunkowo niewrażliwe na obecność rtęci w środowisku, jednak przy podwyższonych stężeniach metalu u takich roślin jak: burak, kukurydza i róża (czyli wrażliwych na toksyczne działanie rtęci) pojawia się chloroza, brunatnienie liści i znaczne uszkodzenia korzeni [Kabata-Pendias 1992].

Szkodliwy wpływ organicznych związków rtęci na rośliny lądowe polega m.in. na obniżeniu poziomu potasu w korzeniach, co zmniejsza niekorzystnie integralność błony komórkowej. Zmniejsza się wówczas efektywność pobierania wody, procesu fotosyntezy oraz transpiracji i syntezy chlorofilu [Radecka, Wesołowski 2005]. Niektóre gatunki (szczególnie roślin wieloletnich) mogą pobierać znaczne ilości rtęci i akumulować ją w tkankach biologicznie nieaktywnych (np. kora i części zdrewniałe).

Takie zabiegi jak zakwaszanie gleby oraz wprowadzanie flory bakteryjnej powodują zwiększenie dostępności organicznych związków rtęci dla roślin. Rośliny wodne są wrażliwe na stężenie miedzi sięgające 1 mg/l w obecności rtęci związanej nieorganicznie, a przy rtęci organicznej nawet na niższe stężenia miedzi. Wysokie stężenia rtęci nieorganicznej hamują wzrost alg [Kozera-Sucharda 2003].

**Przydatność roślin do oczyszczania gleb z Hg.** Wśród roślin porastających tereny naturalnie wzbogacone w metale (tzw. metalofitów) występują rośliny, mające zdolność nadzwyczajnej akumulacji metali. Mogą one rosnąć na zanieczyszczonych glebach oraz gromadzić w tkankach znaczne zawartości metali. Intensywność pobierania w stosunku do przyrostu zawartości substancji w glebie jest wielokrotnie większa, co jest związane ze zwiększonym pobieraniem rtęci z gleby. Ta charakterystyczna cecha jest wykorzystywana w technologii fitoremediacji (tzn. usuwania i/lub unieruchomiania zanieczyszczeń w glebie przez rośliny), a w szczególności w technikach fitoekstrakcji, fitostabilizacji oraz fitowolatalizacji.

Fitoekstrakcja wykorzystuje zdolność roślin do kumulowania metali we własnych tkankach. Z kolei fitostabilizacja to wykorzystanie pewnych gatunków roślin do unieruchamiania zanieczyszczeń w glebie przez:

- absorpcję i akumulację przez korzenie,
- adsorpcję na powierzchni korzeni,
- strącanie w strefie sąsiadującej z korzeniami roślin (rizosferze).

Techniki te mogą być stosowane w odniesieniu do rtęci.

Fitowolatalizacja to pobieranie zanieczyszczenia przez roślinę, a następnie uwalnianie zanieczyszczenia lub modyfikowanej jego formy z rośliny do atmosfery. Technika ta może być stosowana do usuwania z gleb zanieczyszczeń organicznych oraz nieorganicznych, takich jak metale m.in. rtęć. Ma ona bowiem właściwość łatwego przechodzenia w formę lotną, co jest warunkiem prawidłowego przebiegu fitowolatalizacji.

W celu oczyszczania gleb zanieczyszczonych rtęcią metodą fitowolatalizacji hoduje się specjalne rośliny transgeniczne. Do ich genotypu wprowadzone zostają bakteryjne geny merA lub merB. Dzięki nim roślina jest w stanie zredukować pobrane z roztworu glebowego toksyczne formy jonowe oraz metylowe do lotnej formy Hg<sup>0</sup> [Wang 2004]. Dzięki temu możliwe jest wyprowadzenie przez roślinę rtęci w tej postaci do atmosfery. Jednakże rtęć uwolniona do atmosfery może zostać ponownie zdeponowana do gruntu i ulec metylacji w wyniku działalności mikroorganizmów. Ma tu zatem miejsce pozorne oczyszczanie gleby i dlatego metoda ta nie jest polecana.

Rośliny, które poddawano badaniom mającym na celu dostosowanie ich funkcji do potrzeb fitowolatalizacyjnych, to m.in. *Arabidopsis thaliana* (rzodkiewnik pospolity), *Nicotiana tabacum* (tytoń szlachetny) oraz *Liliodendron tulipifera* (tulipanowiec amerykański).



#### 4. WNIOSKI

1. Rtęć jest metalem bardzo mobilnym w środowisku ze względu na łatwość przechodzenia w różne formy chemiczne, a przede wszystkim w formę lotną  $Hg^0$ .
2. Metal ten jest transportowany zarówno w obrębie atmosfery, jak i gleby oraz wody. Może ona łatwo migrować między tymi środowiskami, a wiele różnorodnych dróg przepływu i przemian rtęci nazywane jest biochemicznym obiegiem rtęci w przyrodzie.
3. Największe emisje rtęci do środowiska powodowane są przez erupcje wulkaniczne i podwodne, wietrzenie i erozję skorupy ziemskiej z minerałami zawierającymi rtęć oraz przez różne gałęzie przemysłu. Większość zanieczyszczeń z tych emisji dostaje się bezpośrednio do powietrza.
4. Do gleby, wody oraz do organizmów żywych rtęć dostaje się w wyniku mokrej i suchej depozycji z atmosfery.
5. Rośliny mogą pobierać omawiany metal przez korzenie z gleby lub przez nadziemne części roślin z powietrza. Znajdująca się w glebie rtęć jest dostępna dla roślin praktycznie wyłącznie w formie metylortęci.
6. Rtęć dla większości organizmów jest toksyczna. Chociaż jest pierwiastkiem niespełniającym funkcji życiowych dla roślin, jest przez nie pobierana, niekiedy w dużych ilościach.
7. Niektóre gatunki roślin, tj. burak, kukurydza i róża, są wrażliwe na zanieczyszczenie rtęcią. Pojawiają się m.in. zniszczenia korzeni oraz chloroza.
8. Wiele gatunków roślin ma zdolność akumulacji rtęci we własnych tkankach lub unieruchamiania jej w strefie korzeniowej.
9. Właściwość akumulacji i stabilizacji rtęci przez rośliny stwarza możliwość oczyszczania gleb z tego pierwiastka technologią fitoremediacji.

#### PIŚMIENNICTWO

- ALLOWAY B.J., AYRES D.C. 1999. Chemiczne podstawy zanieczyszczenia środowiska. PWN, Warszawa.
- DĄBKOWSKA-NASKRĘT H., BARTKOWIAK A., RÓŻAŃSKI S. 2008. Zawartość rtęci w glebach intensywnie użytkowanych rolniczo obszaru Pomorza i Kujaw. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych 35/36, IOŚ, Warszawa: 153–156.
- DĄBROWSKI J. 1992. Biogeochemia rtęci w różnych środowiskach. Rtęć w środowisku – problemy ekologiczne i metodyczne. Ossolineum: 27–40.
- HŁAWICZKA S. 2008. Rtęć w środowisku atmosferycznym. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze.
- JĘDRZEJCZAK R. 2000. Studia nad występowaniem rtęci i selenu w żywności pochodzenia roślinnego z uwzględnieniem walidacji metod oznaczania. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn.

- KABATA-PENDIAS A. 1992. Biogeochemia rtęci w różnych środowiskach. Rtęć w środowisku – problemy ekologiczne i metodyczne. Ossolineum: 7–18.
- KIEPAS-KOKOT A., KUCHARSKA T., ZABŁOCKI Z. 2003. Zmiany akumulacji rtęci w szpilkach sosny i mchach na tle ilości spalanego węgla w elektrowni Dolna Odra. Obieg pierwiastków w przyrodzie, t. II, IOŚ, Warszawa: 290–295.
- KOZERA-SUCHARDA B. 2003. Metylortęć w środowisku. Obieg pierwiastków w przyrodzie t. II. IOŚ, Warszawa: 76–78.
- RADECKA I., WESOŁOWSKI M. 2005. Concentration and distribution of mercury in rhizomes and roots of medicinal plants. Obieg pierwiastków w przyrodzie t. III. IOŚ, Warszawa: 337–341.
- SZPADTA R. 1994. Zanieczyszczenie środowiska rtęcią i jej związkami. Biblioteka Monitoringu Środowiska. PIOŚ, Warszawa.
- WANG Y. 2004. Phytoremediation of mercury by terrestrial plants. Department of Botany Stockholm University, Sztokholm.
- WESOŁOWSKI M., RADECKA I., BARCA G., MARON J. 2003. Oszacowanie skażenia rtęcią liści, owoców, nasion i korzeni roślin leczniczych. Obieg pierwiastków w przyrodzie t. II. IOŚ. Warszawa: 259–268.
- WOJNAR K., WISZ J. 2006. Rtęć w polskiej energetyce. „Energetyka” – kwiecień 2006. [www.epa.gov](http://www.epa.gov).