

Jacek Fabisiak\*

## IZOTOPY PLUTONU W PTAKACH MORSKICH I ICH OBIEG W EKOSYSTEMIE MORZA BAŁTYCKIEGO

## ISOTOPES OF PLUTONIUM IN MARINE BIRDS AND THEIR CIRCULATION IN THE BALTIC SEA ECOSYSTEM

**Słowa kluczowe:** Morze Bałtyckie, radiochemia, pluton, akumulacja.

**Key words:** The Baltic Sea, radiochemistry, plutonium, accumulation.

*The aim of this work was to determine isotopes of plutonium ( $^{238}\text{Pu}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$ ) content in marine birds, which permanently or temporarily live in the Polish part of the Baltic Sea (mainly in the Gdansk Bay zone). Furthermore, on the base of the self carried researches and the information from the literature it's been proposed a scheme of migration of plutonium in the southern Baltic Sea ecosystem with added marine birds.*

*The results show that plutonium appears in unimportant amount in marine birds and it is non-uniformly distributed in their organs and tissues. The highest activities of isotope of plutonium  $^{238}\text{Pu}$  were observed in feather: from  $0.04 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Somateria mollissima*) to  $0.24 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Clangula hyemalis*) and in the rest of viscera from:  $0.05 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Somateria mollissima*, *Clangula hyemalis* and *Gavia stellata*) to  $0.14 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Melanitta fusca*). The lowest activities of this isotope were observed in muscles:  $0.03 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Gavia stellata*).*

*In case of isotopes of plutonium  $^{239+240}\text{Pu}$  the highest activities were observed in the rest of viscera from:  $0.13 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Alca torda*) to  $4.25 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Cephus grylle*) and in liver from:  $0.16 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Somateria mollissima*) to  $4.18 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Aythya fuligula*), but the lowest in muscles from:  $0.05 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Clangula hyemalis*) to  $0.11 \mu\text{Bq/g m.m.}$  (*Gavia stellata*). The results show that the main source of plutonium in marine birds is plutonium contained in food and air. Based on signed average concentration of plutonium in*

---

\* Dr inż. Jacek Fabisiak – Akademia Marynarki Wojennej, ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia; tel.: 58 626 28 82; e-mail: j.fabisiak@amw.gdynia.pl

*representatives of biocenosis of southern Baltic Sea affirmed that contents of plutonium in organisms living in this environment grow in the line: marine birds< fish< zooplankton< phytoplankton< zoobentos< phytobentos.*

## 1. WPROWADZENIE

Środowisko przyrodnicze jest przedmiotem wielu badań radiochemicznych, jednak szczególnie narażonym na skażenie radionuklidami jest środowisko morskie. Stanowi ono miejsce składowania odpadów z instalacji jądrowych, a w jego bliskim sąsiedztwie umiejscowiona jest znaczna liczba reaktorów energetycznych i badawczych, fabryk produkcji paliwa jądrowego oraz zakładów przerobu wypalonego paliwa jądrowego, które stanowią istotne źródła skażenia radioaktywnego tego ekosystemu. W środowisku morskim obecne są również radionuklidy pochodzące z próbnych wybuchów jądrowych, wypadków satelitów nawigacyjnych oraz awarii cywilnych instalacji jądrowych [Skwarzec 2002].

Pośród radionuklidów obecnych w przyrodzie emiterzy cząstek alfa odgrywają znaczącą rolę w określaniu radioaktywnego skażenia środowiska, jak również podczas oceny radiologicznych skutków związanych z ich nagromadzeniem w materii żywej. Do grona najbardziej radiotoksycznych należą naturalne izotopy polonu i uranu oraz sztuczne izotopy plutonu. Niezależnie od źródeł ich pochodzenia ulegają one procesom nagromadzenia w organizmach roślinnych i zwierzęcych, a intensywność tego procesu jest szczególnie widoczna właśnie w środowisku wodnym [Skwarzec i in. 2001, 2006]. W przypadku pierwiastków występujących w ilościach śladowych, także radionuklidów, każdy akwen morski wykazuje swoistą odrębność w charakterze ich występowania. Obserwuje się w nich ogromne rozpiętości zarówno w stężeniach różnych pierwiastków, jak i we wzajemnych proporcjach. Czynniki te powodują, że organizmy zamieszkujące ekosystemy morskie wykazują zarówno sezonowość w pobieraniu i nagromadzeniu mikroelementów, jak również odznaczają się znacznym zróżnicowaniem składu chemicznego, nawet w obrębie tych samych gatunków [Bojanowski 1972].

Obecne poziomy aktywności radionuklidów  $\alpha$ -promieniotwórczych w różnych elementach środowiska są na tyle niskie, że nie przedstawiają praktycznie żadnych ogólnościowych zagrożeń radiologicznych. Występują jednak regionalne i lokalne narażenia, związane z katastrofą w Czarnobylu i awariami w przemyśle jądrowym. Z tego względu aktualne badania radiologiczne koncentrują się na wyznaczaniu dróg transportu i koncentracji radionuklidów w poszczególnych elementach ekosfery, ze szczególnym uwzględnieniem łańcucha pokarmowego człowieka.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań dotyczące nagromadzenia izotopów plutonu ( $^{238}\text{Pu}$  i  $^{239+240}\text{Pu}$ ) w wybranych ptakach morskich, zasiedlających obszar Zatoki Gdańskiej, oraz obieg Pu w ekosystemie Morza Bałtyckiego.

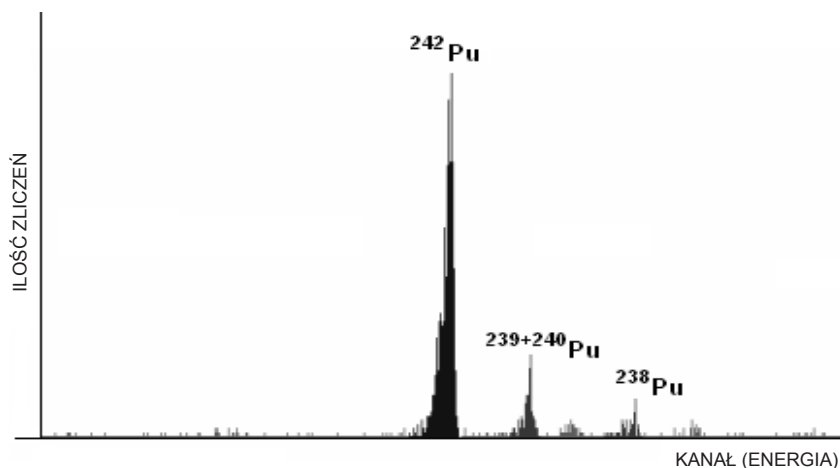
## 2. MATERIAŁ BADAWCZY I METODA BADAŃ

Przedmiotem badań były ptaki morskie zasiedlające rejon Zatoki Gdańskiej i jednocześnie reprezentujące:

- gatunki zimujące (alka krzywonosa *Alca torda*, czernica *Aythya fuligula*, edredon *Somateria mollissima*, lodówka *Clangula hyemalis*, uhla *Melanitta fusca*);
- gatunki przelotne (nurnik białoskrzydły *Cephus grylle*, nur rdzawoszyi *Gavia stellata*, nurzyk podbelały *Uria aalge*);
- gatunki lęgowe (kormoran *Phalacrocorax carbo*, łyska *Fulica atra*).

Ptaki po dostarczeniu do laboratorium poddano sekcji, w wyniku której wyodrębniono: pióra, mięśnie, skórę, wątrobę, szkielet i tzw. „pozostałe trzewia”, które stanowiły organy wewnętrzne ptaków, z wyjątkiem wątroby. Każdą podsekcyjną próbę zważono i przygotowano do analizy radiochemicznej, która obejmowała: mineralizację materiału biologicznego, którą prowadzono na gorąco w stężonym kwasie azotowym, wyizolowanie i oczyszczenie izotopów plutonu na żywicach jonowymiennych, elektrolizę na płytkach ze stali nierdzewnej oraz pomiar i oznaczenie aktywności izotopów plutonu ( $^{238}\text{Pu}$  i  $^{239+240}\text{Pu}$ ) za pomocą spektrometru alfa firmy Canaberra-Packard (USA).

W celu określenia odzysku radionuklidów plutonu dodano przed analizą do przygotowanych próbek tkanek i narządów badanych wzorec plutonu  $^{242}\text{Pu}$  (5,69 mBq), który nie występuje w środowisku naturalnym i emituje cząstki alfa o energii istotnie różniącej się od analizowanych izotopów, a także charakteryzuje odpowiednio długi okres półtrwania. Przykładowe widmo promieniowania  $\alpha$  izotopów plutonu z próbki materiału biologicznego przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Widmo promieniowania  $\alpha$  plutonu z próbki materiału biologicznego [Fabisiak 2007].

**Fig. 1.** Alpha-radiation spectrum from biological material

Granice oznaczalności (MDA) aktywności oznaczanych izotopów plutonu w Bq metodą pomiarową zastosowaną w badaniach, wyznaczono z zależności:

$$MDA = \frac{L_d}{t_p \cdot e \cdot W} \quad (1)$$

gdzie:

$t_p$  – czas pomiaru [s];

$e$  – wydajność detektora;

$W$  – odzysk w próbce analitycznej;

$L_d$  – zaproponowana przez Hurtgena i innych [2000] granica oznaczalności (detection limit) radionuklidów, określona formułą:

$$L_d = 2,86 + 4,78\sqrt{(B + 1,36)} \quad (2)$$

gdzie:

$B$  – liczba zliczeń tła.

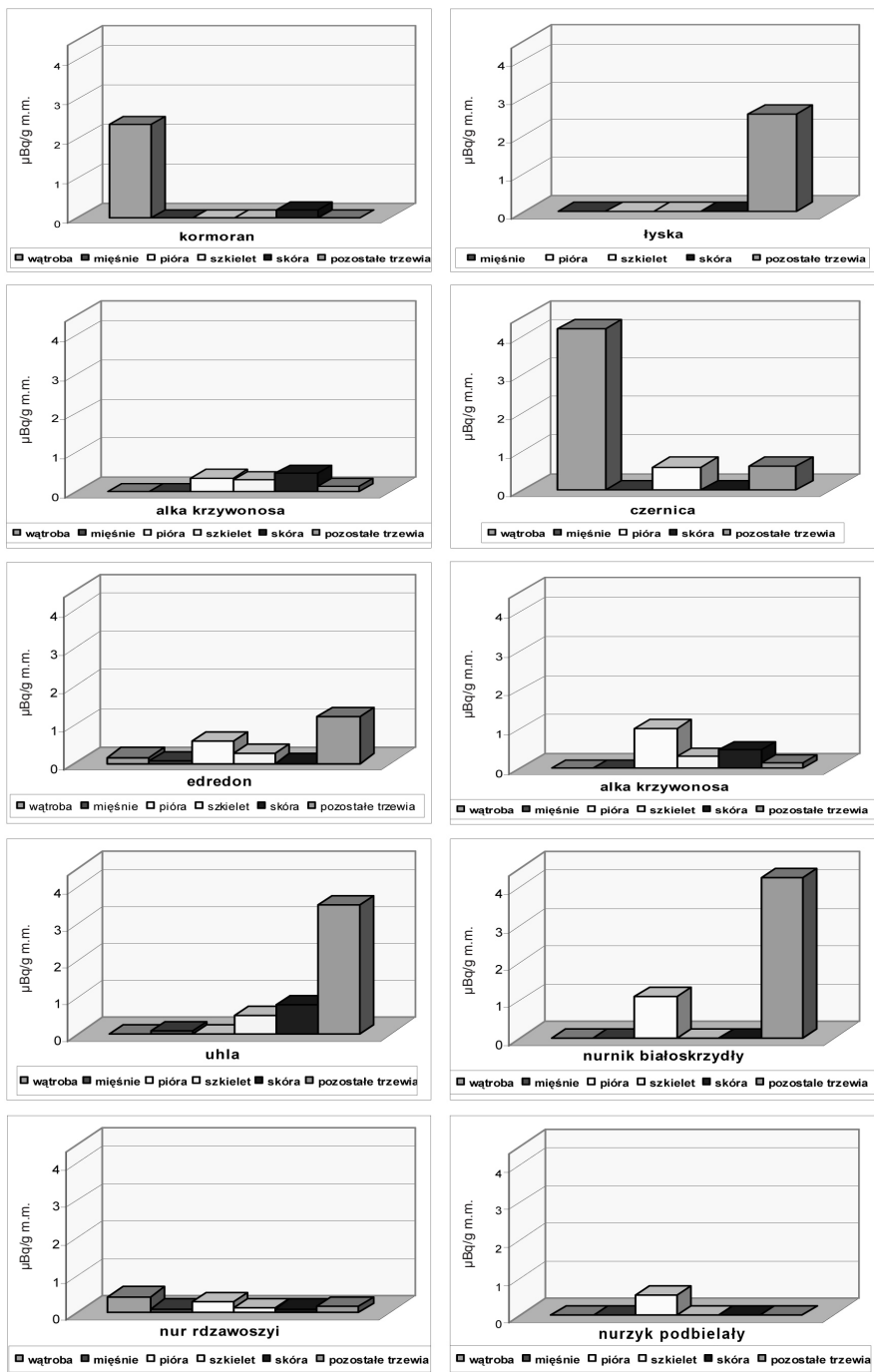
MDA aktywności  $^{238}\text{Pu}$  i  $^{239+240}\text{Pu}$  wynosiła odpowiednio: 0,10 i 0,11 mBq.

### 3. WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Stężenia plutonu w narządach i tkankach badanych ptaków morskich są niewielkie. Spośród analizowanych próbek jedynie w 22% obliczone aktywności  $^{238}\text{Pu}$  znajdują się powyżej wyznaczonej wartości granicy oznaczalności MDA. W przypadku  $^{239+240}\text{Pu}$  MDA przekroczone w 57% badanych próbek. Graficzne porównanie wartości stężeń  $^{239+240}\text{Pu}$  zobrazowano na rysunku 2. Tylko w przypadku lodówki i nura rdzawoszyjego wartości stężeń  $^{239+240}\text{Pu}$  we wszystkich analizowanych narządach i tkankach znajdują się powyżej granicy oznaczalności, a średnie stężenia  $^{239+240}\text{Pu}$  w całym organizmie tych gatunków wynoszą odpowiednio: 0,58  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  i 0,17  $\mu\text{Bq/g m.m.}$

Otrzymane wartości stężeń  $^{238}\text{Pu}$  i  $^{239+240}\text{Pu}$  w narządach i tkankach badanych ptaków morskich wskazują na znaczne zróżnicowanie nagromadzania izotopów plutonu w organizmie badanych gatunków. Największe wartości stężenia  $^{238}\text{Pu}$  stwierdzono w piórach, które mieszczą się w przedziale od 0,04  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (edredon) do 0,24  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (lodówka).

Mniejsze wartości stężenia  $^{238}\text{Pu}$  zaobserwowano w pozostałych trzewiach: od 0,05  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (edredon, lodówka i nur rdzawoszyi) do 0,14  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (uhła), w szkielecie: od 0,03  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (lodówka i nur rdzawoszyi) do 0,07  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (uhła) oraz w skórze: 0,08  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (uhła). Najmniejsze stężenia  $^{238}\text{Pu}$  stwierdzono w mięśniach – 0,03  $\mu\text{Bq/g m.m.}$  (nur rdzawoszyi). W wątrobie stężenia  $^{238}\text{Pu}$  nie przekroczyły wyznaczonej granicy oznaczalności.



Rys. 2. Stężenie  $^{239+240}\text{Pu}$  w narządach i tkankach ptaków morskich

Fig. 2. Activity of isotopes of plutonium  $^{239+240}\text{Pu}$  in organs and tissues of marine birds

Największe wartości stężeń  $^{239+240}\text{Pu}$  stwierdzono w pozostałych trzewiach, które w zależności od gatunku, mieściły się w przedziale od 0,13  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w alce krzywonosej do 4,25  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w nurniku białoskrzydłym oraz w wątrobie od 0,16  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w edredonie do 4,18  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w czernicy. Mniejsze stężenia  $^{239+240}\text{Pu}$  odnotowano w piórach: od 0,31  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w nurze rdzawoszyim do 1,35  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w lodówce oraz w szkielecie od 0,14  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w nurze rdzawoszyim do 0,52  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. w uhli, najmniejsze natomiast w mięśniach, od 0,05  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. (lodówka) do 0,11  $\mu\text{Bq/g}$  m.m. (nur rdzawoszyi). Stężenia  $^{239+240}\text{Pu}$  w narządach i tkankach badanych ptaków morskich są mniejsze niż oznaczone w narządach i tkankach popularnych ryb z południowego Bałtyku (średnio w całym organizmie 3,5  $\mu\text{g/g}$  m.m.) oraz znacząco mniejsze niż w skorupiakach, małżach i roślinach morskich – odpowiednio: 9, 11 i 12  $\mu\text{g/g}$  m.m. [Skwarzec 1995].

Rozmieszczenie plutonu w analizowanych gatunkach ptaków jest nierównomierne. Najwięcej  $^{239+240}\text{Pu}$  znajduje się w trzewiach badanych gatunków: od 12  $\mu\text{Bq}$  (alka krzywonosa) do 998  $\mu\text{Bq}$  (uhla), w wątrobie od 19  $\mu\text{Bq}$  (edredon) do 261  $\mu\text{Bq}$  (kormoran) oraz w piórach: od 55  $\mu\text{Bq}$  (czernica i nurzyk podbieleły) do 155  $\mu\text{Bq}$  (edredon). Znaczące ilości koncentrują się także w szkielecie: od 68  $\mu\text{Bq}$  (nur rdzawoszyi) do 252  $\mu\text{Bq}$  (uhla) oraz w skórze od 13  $\mu\text{Bq}$  (lodówka) do 252  $\mu\text{Bq}$  (uhla). Pomimo znacznego udziału mięśni w ogólnej masie ptaków morskich, od 21,4% (czernica) do 31,3% (kormoran), w tej właśnie tkance nagromadza się najmniej tego izotopu od 10  $\mu\text{Bq}$  (lodówka) do 62  $\mu\text{Bq}$  (nur rdzawoszyi).

W celu ustalenia miejsc, w których izotopy plutonu wykazują tendencje do kumulowania się wyznaczono znormalizowane współczynniki udziału  $^{239+240}\text{Pu}$  PF\*\*, wskazujące na ich względną kumulację w narządach i tkankach badanych ptaków. Współczynniki PF  $^{239+240}\text{Pu}$ , obliczono tylko dla lodówki oraz nura rdzawoszyiego. Wynosiły one odpowiednio: dla wątroby: 1,5 i 2,6, mięśni: 0,1 i 0,7, piór: 2,3 i 1,8, szkieletu: 0,6 i 0,8, skóry: 0,2 i 0,7 oraz pozostałych trzewi: 2,5 i 1,1. Otrzymane wartości współczynnika PF wskazują, że  $^{239+240}\text{Pu}$  wykazuje tendencje do kumulowania się w wątrobie i pozostałych trzewiach (prawdopodobnie w nerkach i płucach). Duże wartości współczynnika PF  $^{239+240}\text{Pu}$  obliczone dla piór nie oznaczają jednoznacznie, że właśnie w nich pluton wykazuje tendencje do kumulowania się. Zawarty tu pluton tylko częściowo pochodzi z procesu wbudowywania go w czasie wzrostu piór. Pozostała jego ilość prawdopodobnie rozprowadzana jest po piórach wraz z wydzieloną gruczołów kuprowych (w czasie konserwacji piór), a także jest zaadsorbowana bezpośrednio z atmosfery.

Otrzymane wyniki potwierdzają wcześniejsze badania rozmieszczenia plutonu w narządach i tkankach zwierząt, w tym zwierząt morskich. W rybach największe stężenia  $^{239+240}\text{Pu}$  obserwuje się w trzewiach, mniejsze w kościach, a najmniejsze w mięśniach [Skwarzec 1995; Szefer 2002]. Podobny rozkład plutonu stwierdzono w organizmie przedstawiciela ssaków

\*\* *PF – (znormalizowany współczynnik udziału radionuklidu w narządzie lub tkance badanego organizmu) iloraz procentowego udziału aktywności radionuklidu w badanym narządzie lub tkance (w stosunku do oznaczonej aktywności tego radionuklidu w całym organizmie) i procentowego udziału masy narządu lub tkanki w całkowitej masie badanego organizmu [Fabisiak 2007].*

morskich – foce szarej, u której największe stężenie izotopów plutonu zaobserwowano w wątrobie, a najmniejsze w mięśniach. Ponadto zaobserwowano, że stężenia plutonu w narządach foki szarej są o rząd wielkości mniejsze niż obserwowane w rybach morskich [Miliard i Whicker 1990; Eisler 1994]. Badania zawartości plutonu w ssakach lądowych, głównie w zwierzętach hodowlanych (bydło, owce) [Gilbert i in. 1989; Ham i in. 1989; Curtis i in. 1991] wykazały, że największe stężenia plutonu obserwuje się w węzłach chłonnych, mniejsze w płucach i wątrobie (na podobnym poziomie), a najmniejsze w mięśniach i kościach.

W organizmie człowieka największe stężenie  $^{239+240}\text{Pu}$  obserwuje się w wątrobie, mniejsze w szkielecie, a najmniejsze w płucach [Taylor 1995; Singh 1997]. Główną drogą wnikania plutonu do organizmu człowieka jest inhalacja aerozoli zawierających ten pierwiastek [ICRP 1986]. Przyjmuje się [ICRP 1993], że 25% inhalowanego w postaci tlenku Pu zatrzymuje się w płucach, 19,5% Pu dostaje się do krwioobrotu, w tym ok. 50% gromadzi się w kościach, od 30 do 45% kumuluje się w wątrobie (Newton i Dmitriew [2001] wykazali, że nawet do 73%), natomiast pozostałe, ok. 10%, przedostaje się do innych organów lub jest szybko z organizmu wydalane. W przypadku przenikania plutonu do organizmu człowieka drogą pokarmową, współczynnik wchłaniania plutonu, jako  $\text{PuO}_2$ , jest bardzo mały i wynosi  $5 \times 10^{-4}$ , co oznacza, że większość spożywanego plutonu jest wydalana w odchodach [ICRP 1993].

W celu określenia źródeł pochodzenia plutonu w piórach przeprowadzono badanie zawartości tego radionuklidu w piórach alki krzywonosej. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że ok. 82%  $^{239+240}\text{Pu}$  zawartego w piórach jest na nich zaadsorbowane i pochodzi przede wszystkim z atmosfery. Należy przypuszczać, że pozostałe 18%, pochodzi z organizmów ptaków i wprowadzane jest w strukturę piór w czasie ich wzrostu.

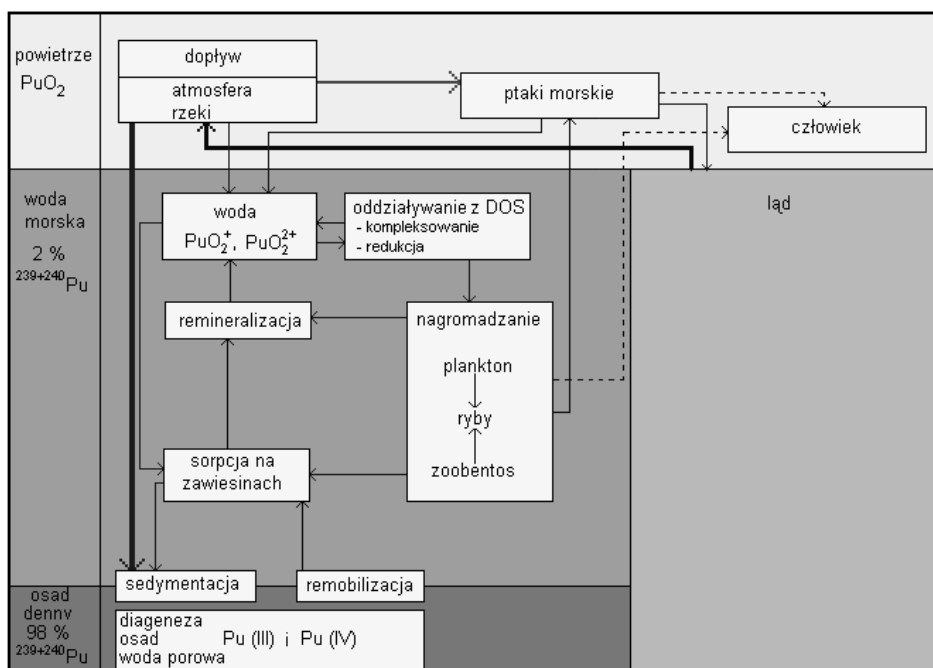
Dotychczasowe badania pochodzenia plutonu w organizmach żywych wykazały, że zwierzęta morskie (zoobentos i ryby) pobierają Pu głównie z pokarmem [Skwarzec 1995]. Szczegółowa analiza diety pokarmowej ptaków oraz miejsca nagromadzenia się  $^{239+240}\text{Pu}$  w ich organizmach, pozwalają stwierdzić, że zarówno inhalacja, jak i pokarm odgrywają znaczącą rolę w jego dostarczaniu do organizmu ptaków morskich. Ptaki preferujące ryby (kormoran, nurzyk podbiały, nur rdzawoszy i alka krzywonosa) charakteryzują się mniejszymi stężeniami  $^{239+240}\text{Pu}$  w narządach i tkankach, podobnie jak ryby będące ich pokarmem [Skwarzec 1995]. Większe stężenia tego radionuklidu obserwuje się u ptaków preferujących mieszany pokarm zwierzęcy (mięczaki, skorupiaki i ryby) z domieszką pokarmu roślinnego (lodówka i edredon) oraz u gatunków preferujących przede wszystkim pokarm roślinny (czernica).

W celu ustalenia źródeł pochodzenia plutonu w organizmach badanych ptaków morskich (opad globalny czy pluton pochodzenia czarnobylskiego) wyznaczono ilorazy aktywności  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  w narządach i tkankach, w których stężenia zarówno  $^{238}\text{Pu}$  i  $^{239+240}\text{Pu}$  przekraczały granicę oznaczalności. W piórach iloraz aktywności  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  wyznaczono dla edredona, alki krzywonosej oraz lodówki i wynosił on odpowiednio; 0,07, 0,09 i 0,18, co odpowiada udziałowi plutonu pochodzenia czarnobylskiego odpowiednio: 5%, 9% i 25%. W szkielecie udział plutonu czarnobylskiego mieścił się w przedziale od 11% (lodówka) do

33% (nur rdzawoszyzi), w pozostałych trzewiach od 0% (edredon, lodówka i uhła) do 45% (nur rdzawoszyzi), w skórze od 11% (uhła) do 32% (nur rdzawoszyzi), w mięśniach nura rdzawoszyjego natomiast Pu pochodzenia czarnobylskiego stanowi 36%. W większości badanych próbek, głównie ze względu na bardzo małe stężenie  $^{238}\text{Pu}$ , jak również w wątrobie, wyznaczenie udziału plutonu czarnobylskiego nie było możliwe. Niemniej jednak stwierdzenie jego obecności w narządach i tkankach świadczy o opóźnionym efekcie dopływu plutonu czarnobylskiego do tego ogniwa morskiego łańcucha troficznego. Przypuszcza się jednak, że głównym źródłem plutonu w ich organizmach jest opad globalny.

Ptaki morskie, podobnie jak inne organizmy bałtyckie, nagromadzają pluton w niewielkim stopniu. Opierając się na oznaczonych średnich stężeniach plutonu w poszczególnych przedstawicielach biocenozy południowego Bałtyku [Möller i in. 1983; Szefer 1987; Szefer i Wenne 1987; Skwarzec 1995] stwierdzono, że zawartość plutonu w organizmach zamieszkujących środowisko morskie zwiększa się w szeregu: ptaki morskie < ryby < zooplankton < fitoplankton < zoobentos < fitobentos.

Na podstawie badań własnych oraz dotyczących migracji plutonu w ekosystemie południowego Bałtyku [Skwarzec 1995] przedstawiono na rysunku 3 rozszerzony o ptaki morskie, a zaproponowany przez Skwarca [1995], schemat migracji plutonu w ekosystemie południowego Bałtyku.



**Rys. 3.** Migracja plutonu w ekosystemie południowego Bałtyku

**Fig. 3.** Migration of plutonium in the Baltic Sea ecosystem



#### 4. WNIOSKI

1. Pluton stwierdzono w narządach i tkankach wszystkich badanych ptaków morskich, jednak występuje wyraźne zróżnicowanie gatunkowe jego zawartości w analizowanych ptakach.
2. Stężenie plutonu w ptakach morskich jest niewielkie, a jego źródłem w ich narządach i tkankach jest głównie opad globalny.
3. Pluton jest rozmieszczony nierównomiernie w narządach i tkankach analizowanych gatunków ptaków morskich. Największa jego zawartość charakteryzuje pozostałe trzewia oraz pióra, najmniejsza natomiast skórę i mięśnie.
4. Około 82% zawartego w piórach Pu jest na nich zaadsorbowana i pochodzi przede wszystkim z atmosfery.
5. Udział plutonu czarnobylskiego w badanych narządach i tkankach ptaków morskich zawiera się w przedziale od 0% do 45%, a największy jego udział procentowy stwierdzono w pozostałych trzewiach nura rdzawoszyjnego. Obecność plutonu czarnobylskiego w organizmie badanych ptaków morskich świadczy o jego opóźnionym efekcie dopływu do tego ogniwa morskiego łańcucha troficznego.

#### PIŚMIENNICTWO

- Age depend doses to members of the public from intake of radionuclides.** 1993. ICRP publication 67, Ann. ICRP 23, nr 3–4.
- BOJANOWSKI R. 1972. Biologiczna akumulacja pierwiastków śladowych w roślinach osiadłych w Bałtyku. *Oceanologia* 2: 5–79.
- CURTIS E.J.C., POPPLEWELL D.S., HAM J.G. 1991. Radioactivity in environmental samples taken in the Sellafield, Ravenglass and Morecambe Bay areas of west Cumbria. *Sci. Total Environ.* 105: 211–231.
- EISLER R. 1994. Radiation hazards to fish, wildlife and invertebrates: a synoptic review. Biological report 26, Patuxen Environmental Science Center U.S. National Biological Service, Laurel, MD 20708.
- FABISIAK J. 2007. Nagromadzenie polonu, uranu i plutonu w ptakach morskich. *Praca doktorska*, Wydział Chemii Uniwersytetu Gdańskiego.
- GILBERT R.O., ENGEL D.W., ANSPAUGH L.R. 1989. Transfer of aged  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$  to cattle grazing a contaminated arid environment. *Sci. Total Environ.* 85: 53–62.
- HAM G.J., HARRISON J.D., POPPLEWELL D.S., CURTIS E.J.C. 1989. The distribution of  $^{137}\text{Cs}$ , plutonium and americium in sheep. *Sci. Total Environ.* 85: 235–244.
- HURTGEN C., JEROME S., WOODS M. 2000. Revisiting Currie – how low can you go? *Appl. Radiat. Isotopes* 53: 45–50.

- MILLARD J.B., WHICKER F.W. 1990. Radionuclide uptake and growth of barn swallows nesting by radioactive leaching ponds. *Health Phys.* 58: 429–439.
- MÖLLER H., SHNEIDER R., SCHNIER CH. 1983. Trace metal and PCB content of mussels (*Mytilus edulis*) from the south-western Baltic Sea. *Int. Rev. Hydrobiol.* 68: 633–647.
- NEWTON D., DMITRIEV S.N. 2001. Tracking the behaviour of plutonium in man: „Radionuclides and Heavy metals Wastes in Environment, Dubna, Russia, 3–6 Oct 2000. Ed. Frontaseva M., Perelygin V.P., Vater P. NATO Science Series, IV Earth and Environmental Sciences vol. 5, Kluwer Academic Publishers 2001: 1–9.
- SINGH N.P. 1997. Is pollution really a threat to man and environment? *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 226: 37–40.
- SKWARZEC B. 1995. Polon, uran i pluton w ekosystemie południowego Bałtyku – Rozprawy i monografie. Instytut Oceanologii PAN Sopot.
- SKWARZEC B. 2002. Radiochemia środowiska i ochrona radiologiczna. Wydawnictwo DI s.c., Gdańsk.
- SKWARZEC B., STRUMIŃSKA D.I., BORYŁO A. 2001. Bioaccumulation and distribution of plutonium in fish from Gdansk Bay. *J. Environ. Radioactiv.* 55 (2): 167–178.
- SKWARZEC B., STRUMIŃSKA D.I., BORYŁO A. 2006. Radionuclides of iron ( $^{55}\text{Fe}$ ), nickel ( $^{63}\text{Ni}$ ), polonium ( $^{210}\text{Po}$ ), uranium ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) and plutonium ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) in Poland and Baltic Sea environment. *Nukleonika* 51 Suppl. 2: 45–51.
- SZEFER P. 1987. Rozmieszczenie i migracja izotopów uranu w wodach śródlądowych i ujściowych. *Stud. Mater. Oceanol.* 51: 133–193.
- SZEFER P. 2002. Metals, metalloids and radionuclides in The Baltic Sea Ecosystem. Trace metals in the environment, vol. 5, Elsevier, Amsterdam, London, Tokyo.
- SZEFER P., WENNE R. 1987. Concentration of uranium and thorium in molluscs inhabiting Gdansk Bay. Baltic Sea. *Sci. Total Environ.* 65: 191–202.
- TAYLOR D.M. 1995. Environmental plutonium in humans. *Appl. Radiat. Isotopes* 46: 1245–1252.