

Naszą misją jest również ciekawa rozrywka i zabawa – zakorzeniona w realiach i wykorzystująca naukowe fakty – skierowana głównie do dzieci, młodzieży i turystów odwiedzających ten bardzo atrakcyjny turystycznie obszar Polski.

W chwili obecnej muzeum jest w trakcie przygotowywania wystawy stałej w nowej siedzibie. Wystawa będzie udostępniana sukcesywnie. Otwarcie pierwszej części ekspozycji planujemy wiosną 2023 r.

Muzeum Badań Polarnych w Puławach
ul. 4 Pułku Piechoty Wojska Polskiego 18
24-100 Puławy
tel. 81 8595913
www.mbppulawy.pl

Katarzyna Szufa^{1,2}, Jerzy W. Mietelski², Maria A. Olech^{3,4}

¹ Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy im. Jana Długosza w Częstochowie

² Polska Akademia Nauk

Institut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego

³ Uniwersytet Jagielloński

Institut Botaniki

⁴ Institut Biochemii i Biofizyki Polskiej Akademii Nauk

k.szufa@gmail.com

OCENA ZANIECZYSZCZEŃ RADIOAKTYWNYCH W ŚRODOWISKU NATURALNYM ANTARKTYKI

Od lat dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie prowadzone są badania nad promieniotwórczością w środowisku naturalnym Antarktyki (Mietelski i inni 2008, 2000). Prezentowane tutaj wyniki są ich kontynuacją. Materiały do tych badań pozyskiwane były w czasie Polskich Wypraw Antarktycznych do Stacji im. Henryka Arctowskiego od 1980 do 2015 roku.

W Pracowni Badań Skażeń Promieniotwórczych Środowiska IFJ PAN wykonuje się pomiary śladowych pierwiastków promieniotwórczych w różnego rodzaju próbach środowiskowych. Oznaczane są radionuklidy o pochodzeniu naturalnym (^{40}K , $^{230,232}\text{Th}$, $^{234,238}\text{U}$) obecne w skorupie ziemskiej od początku istnienia Ziemi oraz radioizotopy sztuczne, antropogeniczne (^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{238,239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am), które znalazły się w środowisku w wyniku działania człowieka. Głównym źródłem sztucznej promieniotwórczości jest globalny opad, czyli pozostałości po atmosferycznych próbnym wybuchach jądrowych prowadzonych, z różnym natężeniem i częstotliwością, od lat czterdziestych do dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku. Fragmenty paliwa jądrowego i produkty

jego rozszczepienia przedostały się do górnych warstw atmosfery i rozprzestrzeniły się po całej powierzchni globu. W wyniku różnego rodzaju zjawisk np. opadów dostały się z atmosfery do hydrosfery, biosfery, litosfery i nieustannie cyrkulują w środowisku. Ślady globalnego opadu znaleziono w Antarktyce już w latach sześćdziesiątych dwudziestego wieku (Picciotto i Wilgain 1963). Poza skażeniem globalnym po testach broni jądrowej, w Antarktyce występuje też specyficznie względnie podwyższona kontaminacja izotopem plutonu ^{238}Pu . Wywołana ona została przez katastrofę Amerykańskiego satelity potocznie nazywanym SNAP-9A (od nazwy termogeneratora jądrowego, który zasiliał satelitę). Na pokładzie znajdowało się około kilogram plutonu, który w wyniku awarii i spłonienia satelity w atmosferze w całości przedostał się do środowiska. Do wypadku doszło w 1964 roku w pobliżu Madagaskaru (Johnson 1986).

Motywacją do podjęcia prezentowanych tu badań, były wyniki poprzednich „projektów antarktycznych” prowadzonych w IFJ. Rezultaty uzyskane do tej pory wskazywały na możliwe różnice w akumulacji radioizotopów między środowiskiem morskim i lądowym. Niestety z powodu zbyt małej ilości prób niemożliwe było przetestowanie statystycznego charakteru tych rozbieżności. Nie wykorzystano również spektrometrii mas, która okazała się bardzo pomocna w ostatnich badaniach i pozwoliła na zaobserwowanie głębiej ukrytych trendów w natężeniu akumulacji izotopów plutonu.

Przeprowadzone ostatnio badania (w latach 2014–2017) obejmowały analizę materiału zgromadzonego w czasie serii Wypraw Antarktycznych Polskiej Akademii Nauk w latach 1980–2015. Zbadano 49 prób ze środowiska lądowego: mech *Sanionia uncinata*, porosty *Usnea antarctica*, *Usnea aurantiacoatra*, trawę *Deschampsia antarctica* i 59 ze środowiska morskiego: ptaki: *Pygoscelis adeliae*, *Pygoscelis papua*, *Macronectes giganteus*, *Pagodroma nivea*, *Catharacta antarctica*, ssaki: *Leptonychotes weddellii*, *Mirounga leonina*, ryby: *Harpagifer antarcticus*, *Chaenocephalus aceratus*, mięczaki: *Nacella concinna*, glony: *Himantothallus grandifolius*, *Iridaea cordata*. Większość materiału została zebrana na Wyspie Króla Jerzego, pojedyncze próby pochodzą z Półwyspu Antarktycznego, Wyspy Zwodniczej, Wyspy Piotra I i Oazy Schirmachera, gdzie pozyskano szczątki petreła śnieżnego (7 prób od 4 osobników).

Do oznaczenia pierwiastków promieniotwórczych wykorzystano metody spektrometrii jądrowej i spektrometrii mas (pomiar wykonano w Instytucie Nauk Geologicznych PAN w Krakowie). Izotopy cezu (^{137}Cs) i potasu (^{40}K) zbadano za pomocą spektrometrów promieniowania gamma, izotop strontu ^{90}Sr oznaczono przy użyciu licznika ciekłoscyntylacyjnego, a radionuklidy plutonu

($^{238,239+240}\text{Pu}^{21}$), toru ($^{230,232}\text{Th}$), uranu ($^{234,238}\text{U}$) i ameryku (^{241}Am) analizowano używając spektrometrów promieniowania alfa. Natomiast spektrometrię mas wykorzystano do poznania stosunku mas izotopów ^{240}Pu i ^{239}Pu ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$). Przygotowanie prób do pomiaru obejmowało nie tylko wysuszenie, oczyszczenie i zhomogenizowanie ale też radiochemiczną procedurę wydzielenia strontu, plutonu, toru, ameryku i uranu. Więcej informacji i szczegółowy opis tych metod można znaleźć w Mietelski i inni 2016, 2004, Łokas i inni 2010, Gaca i inni 2005.

Analiza otrzymanych wyników pokazała, że zanieczyszczenia radioaktywne, pochodzące ze źródeł antropogenicznych, są nawet o kilka rzędów wielkości niższe od naturalnej promieniotwórczości obecnej w środowisku Antarktyki. W próbach ze środowiska morskiego średnie stężenie izotopu potasu ^{40}K wyniosło 1340 Bq/kg^{22} natomiast izotop cezu ^{137}Cs wykryto tylko w dwóch próbach (tkanki miękkie i kości petreła śnieżnego różnych osobników) i zanotowano wyniki: $18,6 \pm 3,4$ i $6,76 \pm 2,68 \text{ Bq/kg}$. Podobnie w materiale badawczym ze środowiska lądowego średnie stężenie ^{40}K wyniosło 370 Bq/kg a ^{137}Cs ponad 10 razy mniej. Średnia koncentracja strontu (^{90}Sr) w obu grupach była na podobnym poziomie, kilku Bq/kg . W przypadku badanych alfa emiterów powtórzył się podobny trend. W próbach morskich zanotowano średnie stężenie $0,052$; $0,26$; $0,31 \text{ Bq/kg}$ odpowiednio dla ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ i ^{241}Am , podczas gdy naturalne pierwiastki $^{230,232}\text{Th}$, $^{234,238}\text{U}$ były średnio na poziomie $2,93$; $3,19$; $5,65$ i $5,14 \text{ Bq/kg}$. Analogiczne różnice wykazano w próbach mchów i trawy. Wyjątek na tym tle stanowiły próby porostów, gdzie nie było różnic w stężeniach aktywności między izotopami plutonu i ameryku a toru i uranu. W próbach *Usnea antarctica* i *Usnea aurantiaco-atra* średnie stężenia ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ i ^{241}Am wyniosły odpowiednio $0,86$; $0,16$; $0,46 \text{ Bq/kg}$, a $^{230,232}\text{Th}$ i $^{234,238}\text{U}$ $0,5$; $0,71$ i $0,83$; $0,8 \text{ Bq/kg}$.

Znając stężenia aktywności poszczególnych izotopów można było wyznaczyć stosunki izotopowe, na podstawie których można identyfikować pochodzenie zanieczyszczeń. Każde ze źródeł charakteryzuje się takim stosunkiem, co stanowi jego swoisty „odcisk palca”, na podstawie którego dokonuje się rozpoznania. Szczególnie interesujące okazały się analizy stosunków aktywności ^{238}Pu do $^{239+240}\text{Pu}$ ($^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$) i stosunków masowych ^{240}Pu do ^{239}Pu ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$). Globalny opad na półkuli południowej charakteryzuje się stosun-

²¹ Energia promieniowania alfa (cząstek alfa) wysyłana przez izotopy plutonu ^{239}Pu i ^{240}Pu jest bardzo podobna przez co przy pomiarach z użyciem spektrometrii alfa nie można efektywnie rozdzielić sygnałów pochodzących od tych izotopów. Żeby to osiągnąć trzeba zastosować bardziej wysublimowaną metodę jaką jest spektrometria mas.

²² Bq (bekerel) to jednostka aktywności substancji radioaktywnej, jej fizyczny wymiar to jeden rozpad na sekundę; przykładowo w substancji o aktywności 50 Bq zachodzi 50 rozpadów jąder atomowych w jednej sekundzie czemu towarzyszy emisja energii promieniowania jonizującego.

kami aktywności: 0,18 i masowym: 0,185. W próbach lądowych większość stosunków oraz wartości średnie pokrywały się z tymi wskaźnikami, co oznacza, że źródłem zanieczyszczeń radioaktywnych na badanych terenach jest właśnie globalny opad. Natomiast wśród prób morskich zanotowano znaczące i ciekawe odchylenia. Średni stosunek aktywności okazał się niższy od globalnego opadu tj. $0,103 \pm 0,002$. Jest to wynik wpływu na ekosystem morski mas wody, charakteryzujących się innymi stosunkami izotopowymi oraz kontakt organizmów morskich z plutonem o odmiennych stosunkach izotopowych w innych częściach świata. Organizmy morskie bowiem migrują na dalekie odległości. Ponadto, dzięki odpowiedniej ilości prób dowiedziono, że różnica między środowiskiem lądowym i morskim jest istotna statystycznie.

Po zastosowaniu spektrometrii mas potwierdzono, że w próbach lądowych kontaminacja radioaktywna pochodzi z globalnego opadu, natomiast zbiór prób z ekosystemu morskiego wykazał kolejne odchylenia. Obok prób, w których w większości manifestował się stosunek masowy zbliżony do globalnego opadu, w obrębie jednego organizmu – petreła olbrzymiego znalezione w 2009 na morenach Lodowca Ekologii na Wyspie Króla Jerzego, ujawniło bardzo różne stosunki masowe $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ tj. $0,726 \pm 0,013$; $0,672 \pm 0,014$ i $0,057 \pm 0,001$. Rozbieżności te można opisać jako różnice w skażeniu zewnętrznym – piór z korpusu ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} = 0,057 \pm 0,001$) i wewnętrznym, tj. wbudowanym we wnętrze ciała: w skórę z korpusu i kości korpusu ($0,726 \pm 0,013$; $0,672 \pm 0,014$). Obniżony, w stosunku do globalnego opadu radioaktywnego, iloraz masowy $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ w piórach interpretuje się jako możliwość kontaktu ptaka z wodami zakontaminowanymi plutonem o stosunku masowym charakterystycznym dla testów bezpieczeństwa prowadzonych przez Francję na poligonach nuklearnych Pacyfiku (Polinezja Francuska). Za hipotezą tą przemawia fakt, że ślady tych testów odkryto wcześniej w rdzeniach lodowych (Arienzo i inni 2016, Koide i inni 1985). Z przeprowadzonej analizy wynika, że znacznie zawyżone stosunki masowe nie są spowodowane kontaminacją w laboratorium ani błędami popełnionymi w czasie w pomiarów. Żaden z przeprowadzonych testów broni jądrowej nie odznaczał się tak wysokimi stosunkami izotopowymi. Pochodzenie nadmiaru ^{240}Pu z $^{244}\text{Cm}^{23}$ również został wykluczony. Można spekulować, czy nie jest to wynik incydentalnego pochłonięcia np. gorącej cząstki (małego fragmentu paliwa jądrowego) o stosunku masowym ok. 0,7, ale wydaje

²³ Na półkuli południowej 16 listopada 1996 doszło w katastrofy rosyjskiej międzyplanetarnej sondy Mars 96, która miała na pokładzie spektrometr do analizy składu pierwiastkowego zaostrzony w źródło kiuru ^{244}Cm ($1,48 \div 1,85$ GBq). Mars 96 wpadł do Oceanu Spokojnego, na zachód od wybrzeży północnego Chile. Izotop kiuru ^{244}Cm poprzez rozpad alfa rozpada się do izotopu plutonu ^{240}Pu . Obecność kiuru w próbce może świadczyć o pochodzeniu ^{240}Pu właśnie z rozpadu ^{244}Cm .

się, że przekonywujące wyjaśnienie tych „egzotycznych” stosunków masowych pozostaje nieznanne.

Podsumowując ten krótki opis tylko części uzyskanych w trakcie badań nad promieniotwórczością w środowisku Antarktyki wyników, warto podkreślić, że ze względu na dużą ilość przebadanych prób otrzymane wyniki kumulacji radioizotopów mogą stanowić informację o tzw. „stanie zerowym”. Jest to zestaw danych, który jest szczególnie istotny w przypadku nowych, ewentualnych skażeń w tamtejszym środowisku. Może on tworzyć swoistą bazę porównawczą do określenia skali wpływu kolejnych, możliwych skażeń. Wobec zapisów w artykule V w Traktacie Antarktycznym (www.ats.aq), który zakazuje jakiegokolwiek działalności związanej z użyciem materiałów jądrowych, testów broni jądrowej czy składowania materiałów radioaktywnych, badanie te wydają się być pożądane.

Badania finansowane były przez NCN w ramach grantu: PRELUDIUM 9 (nr projektu: 2015/17/N/ST10/03116).

Wykaz wykorzystanej literatury:

- ARIENZO M.M., MCCONNELL J.R., CHELLMAN N., CRISCITIELLO A.S., CURRAN M., FRITZSCHE D., KIPFSTUHL S., MULVANEY R., NOLAN M., OPEL T., SIGL M., STEFFENSEN J.P. 2016. A Method for Continuous ^{239}Pu Determinations in Arctic and Antarctic Ice Cores. *Environmental Science & Technology* 50: 137066-7073.
- GACA P., MIETELSKI J.W., KITOWSKI I., GRABOWSKA S., TOMANKIEWICZ E. 2005. ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in mammals' skulls from owls' pellets and owl skeletons in Poland. *Journal of Environmental Radioactivity* 78: 93–103.
- JOHNSON N L. 1986. Nuclear power supplies in orbit. *Space Policy* 2: 223-233.
- KOIDE M., BERTINE K.K., CHOW T.J., GOLDBERG E.D. 1985. The $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ratio, a potential geochronometer. *Earth and Planetary Science Letters*. 72: 1-8.
- ŁOKAS E., MIETELSKI J.W., KLESZCZ K., TOMANKIEWICZ E. 2010. A sequential procedure for determining ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{90}Sr , U and Th activities in soils and peats from Spitsbergen. *Nukleonika* 55: 195–199.
- MIETELSKI J.W., GACA P., OLECH M.A. 2000. Radioactive contamination of lichens and mosses collected in South Shetlands and Antarctic Peninsula. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 3: 527-537.
- MIETELSKI J.W., OLECH M.A., SOBIECH-MATURA K., HOWARD B.J., GACA P., ZWOLAK M., BŁAŻEJ S., TOMANKIEWICZ S. 2008. ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{90}Sr in biological samples from King George Island (Southern Shetlands) in Antarctica. *Polar Biology* 31: 1081-1089.
- MIETELSKI J.W., SZWAŁKO P., TOMANKIEWICZ E., GACA P., MAŁEK S., BARSZCZ J., GRABOWSKA S. 2004. ^{137}Cs , ^{40}K , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am and $^{243+244}\text{Cm}$ in forest litter and their transfer to some species of insects and plants in boreal forests: Three case studies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 262: 645–660.
- MIETELSKI, J W, KIEREPKO R., ŁOKAS E., CWANEK A., KLESZCZ K., TOMANKIEWICZ E., MRÓZ T., ANCKIEWICZ R., SZĄLKOWSKI M., WĄS B., BARTYZEL M., MISIAK R. 2016. Combined, sequential procedure for determination of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{234}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am applied for study on contamination of soils near Żarnowiec Lake (northern Poland). *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry* 310: 661–670.

Varia

SZUFA K.M., MIETELSKI J.W., OLECH M.A., KOWALSKA A., BRUDECKI K. 2020. Anthropogenic radionuclides in Antarctic biota – dosimetical considerations, Journal of Environmental Radioactivity 213:106140
(www.ats.aq) Traktat Antarktyczny