

Politechnika Łódzka
Wydział Chemiczny
Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej

dr Magdalena Długosz-Lisiecka

Ocena zachowania i pochodzenia ^{210}Pb i ^{210}Po w atmosferze

Łódź, 2017

Spis treści

1. Dane osobowe	3
2. Wykształcenie	3
3. Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych (wraz ze wskazaniem pełnionych w tym czasie funkcji):.....	3
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego zgłoszonego jako podstawa postępowania habilitacyjnego.	4
a) Tytuł osiągnięcia naukowego:.....	4
b) Spis monotematycznych publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe zgłoszone jako podstawa do przewodu habilitacyjnego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy).	4
c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.	6
I. Wstęp.....	6
II. Cel i zakres badań	9
III. Zastosowane metodyki badawcze	9
IV. Klasyczne metody oceny czasów życia aerozoli	11
V. Źródła ^{210}Po w atmosferze	14
VI. Sztuczne (antropogeniczne) źródła ^{210}Po wynikające z technicznej działalności człowieka	16
VII. Rozwinięcie metody oceny czasów przebywania aerozoli w atmosferze i jej zastosowanie do oceny źródeł emisji radionuklidów	18
VIII. Wykorzystanie biomonitoringu do oceny źródeł emisji ^{210}Po w terenie zurbanizowanym	23
IX. Podsumowanie	25
X. Najbliższe plany badawcze	26
XI. Literatura:.....	27
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.....	31

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: **Magdalena Długosz-Lisiecka**

2. Wykształcenie

Posiadane dyplomy, stopnie naukowe (z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej):

2006-2010 Politechnika Łódzka, Wydział Chemiczny
Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej
Tytuł: Doktor nauk chemicznych,
Promotor: Prof. dr hab. inż. Henryk Bem,

Praca pod tytułem: **Źródła radionuklidów: ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra i ^{228}Ac (^{228}Ra) w powietrzu atmosferycznym w Łodzi i związane z tym narażenie radiologiczne ludności**

Praca wyróżniona w konkursie Marszałka Województwa Łódzkiego na najlepsze rozprawy habilitacyjne i doktorskie oraz prace magisterskie i dyplomowe, tematycznie związane z województwem łódzkim.

Za tę pracę otrzymałam również Indywidualną Nagrodę Naukową przyznaną przez Prezydenta Miasta Łodzi.

2001-2006 Uniwersytet Łódzki
Wydział: Fizyki i Chemii, Fizyka doświadczalna
Magister fizyki

Praca pod tytułem: **Badania porównawcze trzech rodzajów spektrometrów elektronów**

2001-2006 Uniwersytet Łódzki
Wydział: Fizyki i Chemii, Informatyka stosowana
Magister informatyki

Praca pod tytułem: **Systemy zbierania i opracowywania danych eksperymentalnych**

1997-2001 Liceum Ogólnokształcące w Opocznie

3. Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych (wraz ze wskazaniem pełnionych w tym czasie funkcji):

10.2012-obecnie

- adiunkt w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej,
- inspektor ochrony radiologicznej-IOR-1 w pracowni klasy III,
- Pełnomocnik Dyrektora do spraw promocji Wydziału,
- zastępca Administratora Licencji Oprogramowania.

10.2010-10.2012 - asystent w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej
Politechniki Łódzkiej,
- inspektor ochrony radiologicznej IOR-1 w pracowni klasy III,
- członek komisji ds. promocji.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego zgłoszonego jako podstawa postępowania habilitacyjnego.

a) Tytuł osiągnięcia naukowego:

Ocena zachowania i pochodzenia ^{210}Pb i ^{210}Po w atmosferze

b) Spis monotematycznych publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe zgłoszone jako podstawa do przewodu habilitacyjnego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy).

Podstawę osiągnięcia stanowi cykl 7 oryginalnych publikacji, artykuł monograficzny oraz artykuł przeglądowy autorstwa habilitantki

H1. Długosz-Lisiecka M., Bem H., (2012) Determination of the mean aerosol residence times in the atmosphere and additional ^{210}Po input on the base of simultaneous determination of ^7Be , ^{22}Na , ^{210}Pb , ^{210}Bi , and ^{210}Po in urban air, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Springer, 293 (1), 135-140, (IF₂₀₁₂=1,467), (25 pkt)

Mój udział polegał na: zaplanowaniu i przeprowadzeniu wszystkich analiz zarówno ^{210}Po techniką spektrometrii alfa, ^7Be , ^{22}Na , ^{210}Pb techniką spektrometrii gamma oraz ^{210}Bi z zastosowaniem nowo opracowanej metody separacyjnej i pomiarem licznikiem ciekłoscyntylacyjnym, następnie ocenie niepewności pomiarowych, a później zestawieniu i interpretacji otrzymanych wyników, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.

Mój udział procentowy szacuję na 90%.

H2. Długosz-Lisiecka M., Bem H., (2012) Aerosol residence times and changes of radioiodine ^{131}I and radiocesium ^{137}Cs activity over Central Poland after the Fukushima-Daiichi nuclear reactor accident, Journal of Environmental Monitoring, Royal Society of Chemistry, 14 (5), 1483-1489, (IF₂₀₁₂=2,085), (25 pkt)

Mój udział polegał na: zaplanowaniu, przeprowadzeniu wszystkich analiz spektrometrycznych zarówno naturalnych jak i sztucznych radionuklidów, następnie ocenie ich niepewności pomiarowych, a później zestawieniu i interpretacji otrzymanych wyników, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.

Mój udział procentowy szacuję na 90%.

H3. Długosz-Lisiecka, M., Bem, H., (2013) Fast procedure for self-absorption correction for low γ energy radionuclide ^{210}Pb determination in solid environmental samples, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Springer, 298 (1), 495-499 (IF₂₀₁₃=1,415), (25 pkt)

Mój udział polegał na: przeprowadzeniu analiz spektrometrycznych ^{210}Pb z zastosowaniem linii 46,5 keV, a następnie zaproponowaniu metody korekcyjnej na samoabsorpcję nieskoenergetycznego promieniowania gamma w materiałach względnie gęstych, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.

Mój udział procentowy szacuję na 90%.

H4. Długosz-Lisiecka M., Wróbel J. (studentka-wolontariuszka), (2014) Use of moss and lichen species to identify ^{210}Po contaminated regions, Environmental Science: Process Impacts, Royal Society of Chemistry, 2014 Nov 19;16(12):2729-33 (IF₂₀₁₄=2,171), (25 pkt)

Mój udział polegał na zaprojektowaniu serii badań, przeprowadzeniu analiz spektrometrycznych ^{210}Po z wcześniejszą separacją radiochemiczną, zestawieniu i interpretacji wyników, opracowaniu map rozkładu znacznika w mchach i porostach w województwie łódzkim, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.

Mój udział procentowy szacuję na 90%.

H5. Długosz-Lisiecka M. (2015) Excess of Polonium-210 activity in the surface urban atmosphere. Part 1. Fluctuation of the ^{210}Po excess in the air, Environmental Science: Processes Impacts, Royal Society of Chemistry, 17(2),458-464, (IF₂₀₁₅=2,401), (25 pkt)

Mój udział polegał na postawieniu hipotezy badawczej, samodzielnym przeprowadzeniu analiz spektrometrycznych ^{210}Po , matematycznej ocenie nadmiaru w próbkach pyłu całkowitego, sezonowej ocenie zmian stężeń, zestawieniu i interpretacji wyników, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.

Mój udział procentowy wynosi 100%.

H6. Długosz-Lisiecka M. (2015) Excess of Polonium-210 activity in the surface urban atmosphere. Part 2. Origin of ^{210}Po excess, Environmental Science: Processes Impacts, Royal Society of Chemistry, 17(2),465-470, (IF₂₀₁₅=2,401), (25 pkt)

Mój udział polegał na postawieniu hipotezy badawczej, przeprowadzeniu analiz spektrometrycznych ^{210}Po , matematycznej ocenie nadmiaru w próbkach środowiskowych, ocenie źródeł pochodzenia nadmiarów, zestawieniu i interpretacji wyników, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.

Mój udział procentowy wynosi 100%.

H7. Długosz-Lisiecka, M. (2015) Promieniotwórczy ^{210}Po w powietrzu atmosferycznym-przegląd, Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce, Nauki Przyrodnicze, Wydawnictwo Młodzi Naukowcy, Tom 1 część 1, ISBN 978-83-65362-02-5, strony 7-11-rozdział monograficzny,

Mój udział polegał na opracowaniu wstępnego przeglądu badań dotyczących oceny stężenia i pochodzenia ^{210}Po w atmosferze w aglomeracji łódzkiej, całościowej interpretacji wyników, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.

Mój udział procentowy wynosi 100%.

H8. Długosz-Lisiecka M. (2016) The sources and fate of ^{210}Po in the urban air: a review, Environment International, Elsevier, 94, 325–330 (IF₂₀₁₅=5,929), (45 pkt)

Mój udział polegał na opracowaniu całościowego przeglądu badań literaturowych dotyczących pochodzenia ^{210}Po w atmosferze w skali światowej, napisaniu manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym.
Mój udział procentowy wynosi 100%.

H9. Długosz-Lisiecka M. (2017) Application of modern anticoincidence (AC) system in HPGe γ -spectrometry for the detection limit lowering of the radionuclides in air filters, Journal of Environmental Radioactivity, Elsevier, 169–170, 104–108 (IF₂₀₁₅=2,047), (30 pkt)

Mój udział polegał na zaplanowaniu, przeprowadzeniu i opracowaniu pomiarów spektrometrycznych dla filtrów w różnej geometrii, przeglądzie literatury, napisaniu tekstu.

Mój udział procentowy wynosi 100%.

Wskaźniki obejmujące publikacje wchodzące w skład dzieła:

Suma IF: **19,916:**

Suma punktów MNiSW:**225**

Średni mój udział przypadający na jedną pracę to **95%**.

Średnia wartość wskaźnika IF przypadającego na jedną pracę to **2,212**

c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

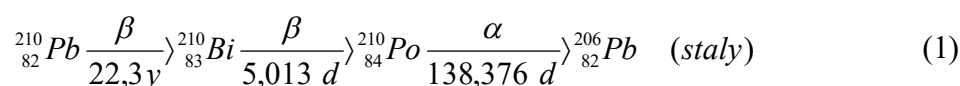
I. WSTĘP

Śmierć Aleksandra Litwinienki w listopadzie 2006 roku zapoczątkowała serię wszechstronnych analiz jednego z najbardziej toksycznych pierwiastków Po, zaczynając od kinetyki nagromadzania się w ludzkim organizmie, po badania jego występowania w środowisku (Seiler i Wiemels, 2012; Kim i inni, 2011, Harrison i inni, 2007, Jefferson i inni, 2009).

W powietrzu atmosferycznym występuje cały szereg izotopów promieniotwórczych różnego pochodzenia. Dominującą część stanowią nuklidy kosmogeniczne (^3H , ^7Be i ^{14}C) oraz pochodzące z naturalnych szeregów promieniotwórczych, głównie uranowo-radowego i torowego. Aktywność właściwa niektórych z tych radionuklidów w atmosferze może, w wyniku działalności przemysłowej, ulec zwiększeniu. W szczególności dotyczy to izotopów: ołowiu ^{210}Pb i polonu ^{210}Po . Polon ma kilkanaście izotopów promieniotwórczych, spośród których najważniejszym jest ^{210}Po o czasie połowicznego zaniku 138,4 dni. Izotop ołowiu ^{210}Pb ma czas połowicznego zaniku $T_{1/2}=22,3$ lat.

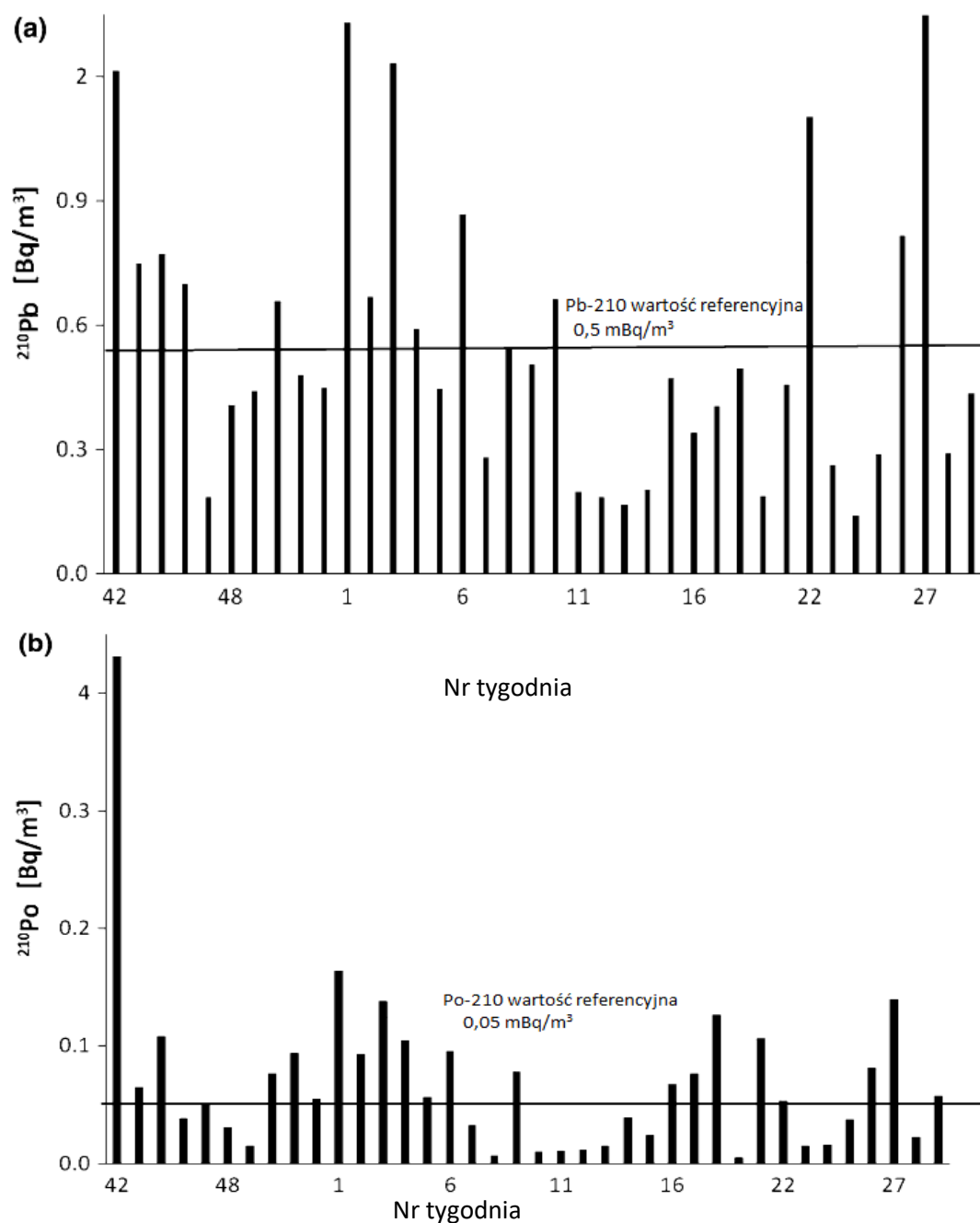
W przyziemnej warstwie atmosfery zawartości radionuklidów ^{210}Po oraz ^{210}Pb zależą od stężenia gazowego ^{222}Rn emanującego z gleby. Działalność przemysłowa człowieka, w tym szczególnie energetyka węglowa i wysokotemperaturowe procesy technologiczne, jak również wybuchy wulkanów mogą dostarczać dodatkowych porcji tych izotopów do środowiska. Polon emitowany z dodatkowych źródeł w wysokiej temperaturze tworzy zwykle lotne związki i szybko kondensuje na drobnych pyłach, które łatwo przedostają się do atmosfery pomimo stosowania wielopoziomowych systemów odpylania. Ponadto polon okazuje się być pierwiastkiem szkodliwym w dwojaki sposób: jest promieniotwórczy (emiter cząstek α) oraz posiada właściwości toksyczne. Podobnie jak ^{210}Pb izotop ten ma również zastosowanie jako znacznik w badaniu dynamiki procesów atmosferycznych.

Radionuklid ^{210}Po powstaje z ^{210}Pb w wyniku dwóch kolejnych rozpadów beta (równanie 1):



Zgodnie z równaniami opisującymi kinetykę kolejnych rozpadów promieniotwórczych stosunek aktywności tych izotopów w atmosferze będzie zależał od czasu ich przebywania w tym układzie. ^{210}Pb oraz jego pochodne w krótkim czasie od ich pojawienia się w atmosferze są adsorbowane na powierzchni pyłu tam zawieszonego. Stosunki aktywności $^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Pb}$ i $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ są często wykorzystywane w opisywanej poniżej metodzie wyznaczania czasu życia aerozoli (Papastefanou, 2006; Moore i inni, 1973, McNeary i Baskaran 2007; Baskaran i Shaw, 2001).

Serie pomiarów poziomów stężeń radionuklidów ^{210}Po i ^{210}Pb występujące w powietrzu miejskim i podmiejskim wskazały na znaczną sezonową fluktuację stężeń ^{210}Po i ^{210}Pb (Rysunek 1. a,b). Stosunkowo dłuższe czasy przebywania aerozoli w powietrzu miejskim, wskazywały na możliwość istnienia dodatkowych źródeł ^{210}Po .



Rysunek 1. Fluktuacje stężenia radionuklidów ^{210}Pb a) oraz ^{210}Po b) w powietrzu miejskim w Łodzi.

Zasadniczą częścią moich badań jest odejściem od klasycznej metody oceny czasów życia aerozoli, na rzecz udoskonalonej wersji, zastosowanej w praktyce do badania emisji tych radionuklidów i oszacowania względnych udziałów różnych źródeł tej emisji. To unikatowe podejście zostało wykorzystane w kolejnych realizowanych przeze mnie pracach badawczych i opisane szczegółowo w różnych wariantach w kolejnych publikacjach [H1, H2, H5], a następnie podsumowane w monoautorskiej pracy przeglądowej pt. „The sources and fate of ^{210}Po in the urban air: a review”, opublikowanej w prestiżowym czasopiśmie Environment International [H9]. Pośrednio badania te są również efektem kierowanego przez

mnie grantu finansowanego przez NCN, w ramach którego przygotowałam unikatowe stanowisko do badań wpływu pionowego transportu ^{210}Pb i ^{210}Po na wyznaczanie czasów przebywania aerozoli w atmosferze i ocenę antropogenicznej emisji tych radionuklidów.

II. CEL I ZAKRES BADAŃ

Zbrodnicze wykorzystanie radionuklidu ^{210}Po zwróciło uwagę naukowców na wysoką radiotoksyczność tego naturalnie występującego izotopu. Pojawiła się konieczność dalszych intensywnych badań dotyczących źródeł i poziomów jego występowania w różnych elementach środowiska oraz oceny narażenia radiologicznego, nawet na niskie dawki, emitowanego w wyniku jego rozpadu promieniowania alfa (Seiler i Wiemels, 2012). Należy tu podkreślić, iż ważnym elementem dawki efektywnej w wyniku ekspozycji ludności na ^{210}Po , obok wchłaniania do organizmu drogą pokarmową (głównie z wodą pitną), jest jego inhalacja wraz z występującymi w powietrzu aerozolami czy z dymem papierosów.

Tematem przewodnim stała się więc ocena zachowania ^{210}Po w środowisku szczególnie w przyziemnej warstwie atmosfery. Dzięki równoczesnej analizie ^{210}Po oraz ^{210}Pb i ^{210}Bi w świeżych próbkach aerozoli, możliwa była ocena udziałów tzw. ^{210}Po związanego z ang. „supported” (pochodzącego z rozpadu ^{210}Pb znajdującego się w powietrzu) i ^{210}Po niezwiązanego z ang. „unsupported” (pochodzącego z innych źródeł emisji tego izotopu do atmosfery). Oba wymienione typy ^{210}Po określają źródła pochodzenia tego radionuklidu w powietrzu. Frakcja tzw. związana może być przypisana naturalnemu pochodzeniu ^{210}Po , który nagromadza się w wyniku rozpadu ^{210}Pb , natomiast frakcja niezwiązana ^{210}Po przypisana jest udziałowi dodatkowych źródeł tego izotopu [H7]. Do realizacji tych celów przygotowałam się poprzez opracowanie metodyki pomiarów bardzo niskich aktywności ^{210}Pb , ^{210}Bi oraz ^{210}Po w aerozolach [H1-H6].

III. ZASTOSOWANE METODYKI BADAWCZE

Właściwa ocena dodatkowego udziału ^{210}Po wymaga regularnych oznaczeń stężenia radionuklidów ^{210}Pb i ^{210}Bi w powietrzu. Do tych oznaczeń konieczne jest zastosowanie różnych technik spektrometrycznych, zarówno spektrometrii promieniowania γ dla ^{210}Pb , ciekłoscyntylacyjnej metody oznaczeń promieniowania β w przypadku ^{210}Bi oraz spektrometrii α dla ^{210}Po .

Różnorodność metod pomiarowych wymusza również zastosowanie różnych technik przygotowania próbek do pomiaru aktywności. Dwie ostatnie techniki spektrometryczne wymagają separacji oznaczanych radionuklidów z jak największą wydajnością odzysku, a biorąc pod uwagę krótki czas połowicznego zaniku ^{210}Bi ($T_{1/2}=5$ dni) dodatkowo pobór i przygotowanie próbki muszą przebiegać bardzo sprawnie i nie powinny być dłuższe niż 1 dzień [H2].

Dla precyzyjniejszej oceny zachowań wszystkich trzech izotopów pomiary były przeprowadzone zarówno w próbkach pyłu całkowitego jak i frakcjonowanego, dla zakresów frakcji od 0,4 do 10 μm średnicy aerodynamicznej, przy wykorzystaniu kaskadowego wysokoprzepływowego impaktora aerozoli [H5,H9].

Szczególnie istotne wydają się być oznaczenia stężeń izotopów we frakcjach najdrobniejszych $< 1 \mu\text{m}$, gdyż to właśnie te wywodzą się z przemysłowej, a szczególnie energetycznej działalności człowieka. Potencjalnymi emiterami Po są wysokotemperaturowe procesy spalania i wytapiania, gdzie pierwiastek ten jako bardziej lotny względem Pb i Bi natychmiast się uwalnia i rozprzestrzenia w rejonie źródła emisji (Al-Masri i inni 2006,2014, Anand i Mayya, 2015).

Metodyka oznaczania ^{210}Pb :

W celu oznaczenia ^{210}Pb całkowitego w powietrzu wykorzystałam pochłanianie pyłów zebranych na filtrze Petrianova stacji ASS 500 pracującej w krajowym systemie monitorowania radioaktywności powietrza. Filtr z materiału organicznego wraz z pyłem był prasowany do postaci cienkich krążków o średnicy ok. 5 cm i wysokości 2 mm. Tak przygotowana próbka była poddana analizie spektrometrycznej z wykorzystaniem półprzewodnikowego detektora HPGe w czasie min. 80 000 s [H1-H3,H9]. Natomiast dla miligramowych ilości różnych frakcji pyłów zebranych na cienkich filtrach kaskadowego impaktora opracowałam oryginalną metodę oznaczania ^{210}Pb w nowoczesnym spektrometrze γ pracującym w układzie antykoincydencyjnym z 9" x 9" osłonnym detektorem NaI(Tl). Problem samoabsorpcji niskoenergetycznego promieniowania γ , pochodzącego od ^{210}Pb został szczegółowo omówiony w pracy [H2]. Dobór optymalnego trybu pomiarowego dla trzech geometrii filtrów został natomiast uwzględniony w pracy [H9].

Metodyka oznaczania ^{210}Po :

Po zakończonym pomiarze stężenia ^{210}Pb techniką spektrometrii promieniowania gamma próbki filtrów z pyłem były umieszczane w zlewce i zalane ok. 5 ml stężonego kwasu HCl oraz 3 ml stężonego kwasu HNO_3 . Po odparowaniu pozostałość zalewano 100 ml 1M HCl . Do wydzielenia ^{210}Po wykorzystana została jego zdolność do spontanicznego osadzania się na metalach szlachetnych. W obecności srebra i w temperaturze powyżej 70°C następuje praktyczna ilościowa depozycja polonu. W naczyniu umieszczałam również wewnętrzny materiał referencyjny ^{209}Po NIST-4326a dla oceny wydajności depozycji. Pomiar spektrometrią promieniowania α izotopu ^{210}Po zajmuje zwykle 80 000 s [H1-H2,H4-H8].

Metodyka oznaczania ^{210}Bi :

^{210}Bi jest czystym emiterym promieniowania β ($E=1,163\text{ MeV}$) i do jego oznaczania w próbkach środowiskowych zawierających inne emitery β , np. ^{40}K konieczna jest jego efektywna separacja. Proponowana radiochemiczna metodyka opiera się na ekstrakcji ^{210}Bi z roztworu 1 M HCl pozostałego po depozycji ^{210}Po .

Z otrzymanego roztworu lub bezpośrednio z wodnej zawiesiny filtratu ^{210}Bi ekstrahowałam do fazy organicznej dwiema porcjami 6 ml roztworu 0,11 M TIOA (tri-iso-octyloaminy) w ksylenie. Po przeniesieniu w sumie 12 ml TIOA w ksylenie do naczynka scyntylacyjnego i dodaniu około 8 ml komercyjnego scyntylatora Ultima Gold F możliwy jest wydajny pomiar stężenia ^{210}Bi techniką ciekłej scyntylacji w ciągu zaledwie kilkunastu minut [H1-H2,H5].

IV. KLASYCZNE METODY OCENY CZASÓW ŻYCIA AEROZOLI

Trzy wymienione izotopy w sposób naturalny powstają z rozpadu ^{222}Rn emanującego z gleby i zwykle ich stężenie zmienia się zależnie od warunków meteorologicznych np. pokrywy śnieżnej, intensywności opadów deszczu itp. Wielosezonowa, regularna ocena stężeń pochodnych tego izotopu w powietrzu daje możliwość oceny nadmiarowego udziału i pozwala na korektę czasu przebywania aerozoli w powietrzu.

W przyziemnej warstwie troposfery stężenia trzech rozpadających się w sekwencji izotopów: $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po}$ zwykle nie osiągają równowagi promieniotwórczej w wyniku depozycji stałej i mokrej aerozoli, co daje możliwość oceny czasu przebywania aerozoli (czasu rezydencji) w atmosferze. Na podstawie stopnia nagromadzenia się pochodnych radionuklidów ^{210}Bi i ^{210}Po w stosunku do macierzystego długo żyjącego

radionuklidu ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ lat) wykorzystując równania Batemana można określić czas życia aerozoli (Poet i inni, 1972; Baskaran i Shaw, 2001; Wallner G., 2002; Papastefanou, 2006).

Powszechnie wykorzystywane są dwa warianty tej metody bazujące na stosunkach pochodnych izotopów ^{210}Bi i ^{210}Po i macierzystego ^{210}Pb . Najprostszą metodą oznaczania czasu życia jest założenie modelu przedziałowego (The Box Model), gdzie stężenie ^{210}Pb i jego pochodnych jest w całej objętości jednorodne (Poet i inni, 1972, H1).

W modelu tym zakłada się również stan ustalony między dopływem radionuklidu (z rozpadu izotopu macierzystego), a jego rozpadem radioaktywnym i depozycją. W przypadku pary ^{210}Pb - ^{210}Bi można zapisać:

Dopływ radionuklidu ^{210}Bi jest równy szybkości rozpadu macierzystego nuklidu ^{210}Pb (równanie 2):

$$\frac{dN_{\text{Bi}}}{dt} = -\frac{dN_{\text{Pb}}}{dt} = \lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}} \quad (2)$$

Usuwanie ^{210}Bi z układu następuje zarówno w wyniku rozpadu ^{210}Bi (równanie 3):

$$-\frac{dN_{\text{Bi}}}{dt} = \lambda_{\text{Bi}} N_{\text{Bi}} \quad (3)$$

jak i depozycji (równanie 4)

$$-\frac{dN_{\text{Bi}}}{dt} = \lambda_{\text{d}} N_{\text{Bi}} \quad (4)$$

gdzie:

N - liczba atomów,

$\lambda_{\text{Bi}}, \lambda_{\text{Pb}}$ - stała rozpadu promieniotwórczego ^{210}Bi i ^{210}Pb ,

λ_{d} - stała szybkość depozycji związana ze średnim czasem życia aerozoli T_{R} zależnością (równanie 5):

$$\lambda_{\text{d}} = 1/T_{\text{R}} \quad (5)$$

Odwrotność czasu życia aerozoli $1/T_{\text{R}}$ odpowiada wartości stałej wymywania λ_{R} aerozoli przez wszystkie procesy.

Zakładając stan ustalony w badanym przedziale można zapisać (równanie 6):

$$\lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}} = \lambda_{\text{Bi}} N_{\text{Bi}} + \frac{1}{T_{\text{RBi}}} N_{\text{Bi}} \quad (6)$$

stąd przekształcając (równanie 7)

$$\lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}} = A_{\text{Pb}} \text{ i } \lambda_{\text{Bi}} N_{\text{Bi}} = A_{\text{Bi}} \quad (7)$$

gdzie A jest aktywnością w [Bq] otrzymujemy (równanie 8):

$$A_{\text{Pb}} = A_{\text{Bi}} \left(1 + \frac{1}{\lambda_{\text{Bi}} T_{\text{RBi}}}\right) \quad (8)$$

Przyjmując stosunek $A_{\text{Bi}}/A_{\text{Pb}}$ jako A otrzymujemy (równanie 9):

$$T_{\text{RBi}} = \frac{A}{\lambda_{\text{Bi}} (1 - A)} \quad (9)$$

Czasy życia oznaczane metodą stosunku aktywności $^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Pb}$ wynoszą zwykle od kilku do kilkunastu dni (Papastefanou, 2006; Moore i inni, 1973, Poet i inni, 1972). Zaletą metody jest krótki czas połowicznego zaniku ^{210}Bi ($T_{1/2}=5$ dni), który jest porównywalny z czasem życia aerozoli w atmosferze. Metoda ta wymaga jednak bardzo sprawnej preparatyki i szybkiego oznaczania stężenia ^{210}Bi . W ciągu około miesiąca od poboru próbki ustala się bowiem równowaga ^{210}Pb - ^{210}Bi i jest to graniczna wartość czasów życia aerozoli, którą możemy tą metodą oznaczyć.

Alternatywny sposób oznaczania czasu życia na podstawie stosunku aktywności $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ z powodzeniem wykorzystywany jest już od ponad 30 lat (Moore i inni, 1973, Papastefanou, 2006).

Zakładając stan ustalony w badanym przedziale podobnie jak dla pary ^{210}Pb - ^{210}Bi możemy zapisać (równanie 10):

$$\lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}} = \lambda_{\text{Bi}} N_{\text{Bi}} + \frac{1}{T_{\text{RPo}}} N_{\text{Bi}} \quad (10)$$

oraz dla dalszej przemiany ^{210}Bi - ^{210}Po (równanie 11):

$$\lambda_{\text{Bi}} N_{\text{Bi}} = \lambda_{\text{Po}} N_{\text{Po}} + \frac{1}{T_{\text{RPo}}} N_{\text{Po}} \quad (11)$$

Przekształcenie wzorów daje następujący związek między aktywnościami ^{210}Po i ^{210}Pb , a czasem życia aerozoli (równanie 12):

$$\frac{\lambda_{\text{Po}} N_{\text{Po}}}{\lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}}} = \frac{\lambda_{\text{Po}} \lambda_{\text{Bi}}}{\left(\lambda_{\text{Po}} + \frac{1}{T_{\text{RPo}}}\right) \left(\lambda_{\text{Bi}} + \frac{1}{T_{\text{RPo}}}\right)} \quad (12)$$

Związek pomiędzy stosunkiem aktywności ^{210}Po ($T_{1/2}= 138,4$ dni) i ^{210}Pb ($T_{1/2}= 22,3$ lat), a czasem życia aerozoli T_{RPo} opisany jest ostatecznie wzorem (równanie 13):

$$\frac{A_{Po}}{A_{Pb}} = \frac{T_{RPo}^2}{(T_{RPo} + \frac{1}{\lambda_{Bi}})(T_{RPo} + \frac{1}{\lambda_{Po}})} \quad (13)$$

Gdzie:

A_{Po} - aktywność ^{210}Po ,

A_{Bi} - aktywność ^{210}Bi ,

λ_{Po} – stała rozpadu ^{210}Po ,

λ_{Bi} – stała rozpadu ^{210}Bi ,

T_{RPo} T_{RPo} – czas życia aerozoli ozn. metodą stosunku odpowiednio $^{210}Po/^{210}Pb$ oraz $^{210}Bi/^{210}Pb$.

Czasy życia wyznaczone na podstawie metody $^{210}Po/^{210}Pb$ wynoszą zwykle od kilku tygodni do kilku miesięcy ([H8; Baskaran i Shaw, 2001]). Metoda wyznaczania czasu życia aerozoli wykorzystująca stosunki aktywności $^{210}Po/^{210}Pb$ może być zastosowana wówczas, gdy spodziewamy się długich okresów przebywania aerozoli w atmosferze. W odróżnieniu od metody z użyciem ^{210}Bi , metoda ta jest mniej wrażliwa na czynniki takie jak długi czas pobierania próbek i opóźnienie analizy po zakończeniu pobierania aerozoli.

V. ŹRÓDŁA ^{210}Po W ATMOSFERZE

Niestety czasy przebywania tych samych aerozoli w atmosferze obliczone obiema metodami z reguły mocno się różnią. Metoda $^{210}Po/^{210}Pb$ daje z reguły zawyżone wartości T_{RPo} (Tabela 1), co wynika z obecności dodatkowych źródeł ^{210}Po w atmosferze.

Tabela 1. Czasy przebywania aerozoli w powietrzu oznaczone metodami stosunków $^{210}Po/^{210}Pb$ oraz $^{210}Bi/^{210}Pb$ oraz wartość skorygowana czasu [dni] [H2].

Kod próbki	Stosunek	T_{RBi}	Stosunek	T_{RPo}	T_{RC}
	aktywności $^{210}Bi/^{210}Pb$		aktywności $^{210}Po/^{210}Pb$		
1016	0,48	6,68	0,096	20,5	25,4
1017	0,14	1,18	0,020	7,9	1,0
1018	0,60	10,85	0,029	10,3	9,5
1019	0,62	11,80	0,002	1,9	11,7
1020	0,59	10,41	0,122	34,5	8,6

1120	0,55	8,84	0,081	23,6	7,85
1121	0,46	6,20	0,057	17,4	5,60
1122	0,66	14,23	0,036	12,2	13,9
1123	0,49	7,18	0,024	9,1	7,1
1124	0,40	4,83	0,029	10,4	4,6
1125	0,64	12,85	0,064	19,2	12,3
1126	0,68	14,99	0,060	18,1	14,7
1127	0,36	4,12	0,062	18,6	3,5
1128	0,35	3,84	0,058	17,7	3,25

W tych przypadkach poprawniejsze wyniki czasu przebywania aerozoli w atmosferze może dać metoda $^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Pb}$. Czas życia aerozoli obliczony na podstawie metody stosunku aktywności $^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Pb}$ w pyłe całkowitym jest zdecydowanie krótszy (najczęściej około tygodnia) niż obliczony na podstawie metody stosunku aktywności $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ (około miesiąca) (Poet et al., 1972; Anand i Mayya, 2015; Kim i inni, 2000).

Brak zgodności tych dwóch metod wyznaczania czasów życia aerozoli może być wyjaśniony jedynie dopływem dodatkowych ilości ^{210}Po nie pochodzących bezpośrednio z rozpadu zaadsorbowanego na powierzchni pyłów macierzystego radionuklidu ^{210}Pb .

Problem wpływu dodatkowych źródeł ^{210}Po w atmosferze na wyznaczanie czasu życia aerozoli metodą $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ opisany został po raz pierwszy przez Poet'a i innych (1972).

Do czynników mających wpływ na dodatkową zawartość tego radionuklidu w atmosferze należą zarówno źródła naturalne jak i sztuczne.

Do pierwszej grupy naturalnych czynników należy zaliczyć:

- erozję i resuspensję gleby, dopływ równowagowych aktywności ^{210}Po i ^{10}Pb (Persson i Holm, 2014; Persson i Holm, 2011)
- napływ starszych pyłów z wyższych warstw atmosfery – stratosfery (Lambert i inni, 1982)
- erupcję wulkanów (Lambert i inni, 1983; Reagan i inni, 2006).

Średnie stężenia ^{210}Po w atmosferze zostały przedstawione w Tabeli 2.

Tabela 2. Stężenie ^{210}Po w troposferze.

Miejsce	Stężenie ^{210}Po [$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$]	Odnosićnik literaturowy
Alaska (USA Eagle)	23	Baskaran i Shaw, 2001
Alaska (USA Poker Flat)	100	Baskaran i Shaw, 2001
Antarktyda	12	Persson i Holm, 2014
Arktyka	23 – 38	Persson i Holm, 2014
Brazylia (São José dos Campos)	249	Silva, 2007
Wielka Brytania (Chilton, Oxfordshire)	2-69	Daish i inni, 2005
Francja (Lamto - Ivory Coast)	30-1000	Nho i inni, 1996
Niemcy	12-80	UNSCEAR, 2000
Indie (Kampur)	2-280	Ram i Sarin, 2012
Włochy (Taranto)	34,5-1105	Jia i Jia, 2014
Polska (Łódź)	9,4 – 137	[H5]
Portugalia (Sacavem)	181	Carvalho, 1995
Hiszpania (Malaga)	45-70	Duenas i inni, 2004
Stany Zjednoczone (Michigan)	72	McNeary i Baskaran, 2007
Stany Zjednoczone	10-40	UNSCEAR, 2000

Stężenie ^{210}Po w atmosferze zależy od długości i szerokości geograficznej oraz geologicznych uwarunkowań punktów pomiarowych (Persson, 2014; Persson and Holm, 2014) (Tabela 2). Najmniejsze zawartości ^{210}Po zostały odnotowane na biegunie północnym i południowym, podczas gdy największe stężenie odnotowuje się na równiku ($>0,2 \text{ mBq}/\text{m}^3$) (Gjelsvik i inni, 2012). Można więc przyjąć, że stężenie ^{210}Po w przyziemnej warstwie atmosfery zmienia się w zakresie od 0,01 do 0,3 mBq/m^3 i zmienia się wraz z wysokością nad poziomem morza, siłą i kierunkiem wiatru, wilgotnością powietrza, stężeniem aerozoli oraz udziałem zanieczyszczeń (McNeary i Baskaran, 2007; Baskaran i Shaw, 2011, Ugur i inni, 2011).

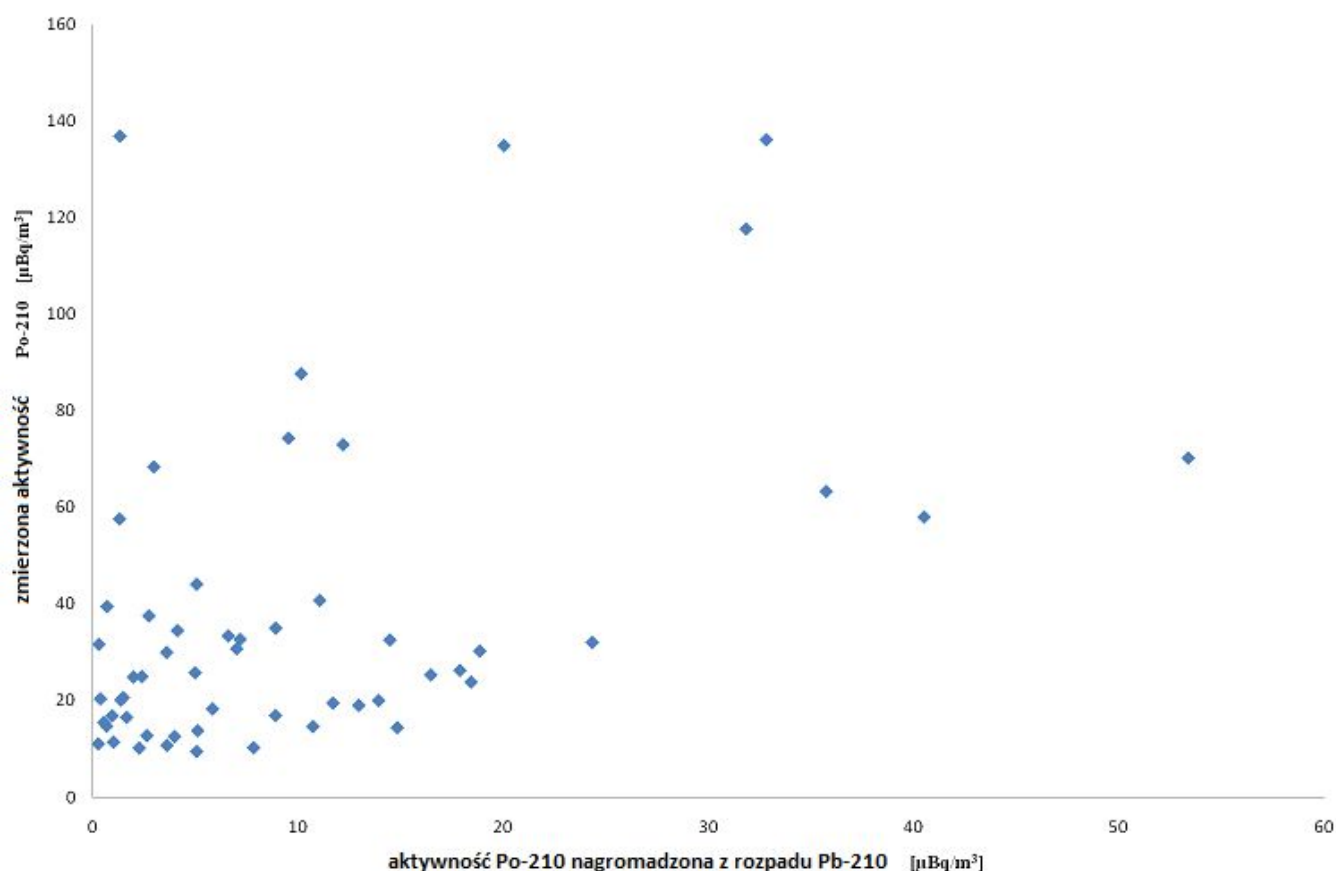
Napływ powietrza ze stratosfery związany jest z cyklem klimatycznym i okresowo nasila się jesienią i wiosną. Udział powietrza z wyższych partii atmosfery może być łatwo wykryty i oszacowany poprzez równoczesne wykorzystanie innych wskaźników, jakim są aktywności kosmogenicznych ^7Be i ^{22}Na powstających w górnych warstwach atmosfery [H6, H9].

VI. SZTUCZNE (ANTROPOGENICZNE) ŹRÓDŁA ^{210}Po WYNIKAJĄCE Z TECHNICZNEJ DZIAŁALNOŚCI CZŁOWIEKA

W emitowanych pyłach „elektrownianych”, które stanowią dominujące źródło zanieczyszczeń w okresie zimowym, cząstkach pochodzenia litosferycznego, czy aerozolach troposferycznych sezonowo napływających z obszaru stratosfery obserwuje się równowagowe aktywności ^{210}Po i ^{210}Pb (a nawet większe stężenie ^{210}Po względem ^{210}Pb) (Poet i inni 1972). Aerozole atmosferyczne równowagi takiej nie wykazują, w wyniku więc

dostarczanych zanieczyszczeń stosunek $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ jest zawyżony, co powoduje w dalszej kolejności przeszacowanie wartości czasu życia aerozoli. A zatem większy stosunek $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ może wynikać z udziału dodatkowej porcji ^{210}Po pochodzącej z innych źródeł niż z rozpadu atmosferycznego ^{210}Pb (Moore i inni 1976).

W pracy [H2] potwierdziłam istnienie dodatkowych źródeł emisji polonu do powietrza w rejonie Łodzi. Zależność pomiędzy zmierzona aktywnością ^{210}Po a wartością, która powinna nagromadzić się z rozpadu ^{210}Pb została zaprezentowana na Rysunku 2:



Rysunek 2. Zależność pomiędzy stężeniem ^{210}Po zmierzonym w powietrzu, a stężeniem ^{210}Po obliczonym na podstawie rozpadu ^{210}Pb .

Istotna większość wyników potwierdza nadmiarowość ^{210}Po względem stężenia jakie w sposób naturalny powinno nagromadzić się z rozpadu ^{210}Pb . Potwierdza to więc hipotezę o istnieniu dominującego źródła dodatkowego, antropogenicznego ^{210}Po w atmosferze miejskiej (wyniki dla aglomeracji Łódzkiej, lata 2011/2012).

VII. ROZWINIĘCIE METODY OCENY CZASÓW PRZEBYWANIA AEROZOLI W ATMOSFERZE I JEJ ZASOSOWANOWANIE DO OCENY ŹRÓDEŁ EMISJI RADIONUKLIDÓW

Szereg przeprowadzonych eksperymentów potwierdziło obecność nadmiarowego ^{210}Po tzn. nie pochodzącego bezpośrednio z rozpadu obecnego w powietrzu ^{210}Pb co wpływa w istotny sposób na wielkość obliczonego czasu przebywania aerozolu w powietrzu metodą $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ w porównaniu z metodą wykorzystującą stosunek aktywności $^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Pb}$. Analiza bilansu tych trzech radionuklidów w powietrzu w oparciu o jednoprzeglądowy (The Box Model) model ich transportu pozwoliła na ilościowe wyznaczenie udziału nadmiarowej w stosunku do ^{210}Po aktywności $^{210}\text{Po} - \Delta A_{\text{Po}}$ zgodnie ze wzorem 14:

$$\Delta A_{\text{Po}} = \frac{A_{\text{Po}} - [A_{\text{Bi}} - A_{\text{Po}}]T_{\text{RC}}\lambda_{\text{Po}}}{1 + T_{\text{R}}\lambda_{\text{Po}}} \quad (14)$$

Gdzie:

$A_{\text{Po, Bi, Pb}}$ – stężenie aktywności ^{210}Po , ^{210}Bi lub odpowiednio ^{210}Pb ,

T_{RC} – rzeczywisty czas przebywania aerozoli w powietrzu [dzień],

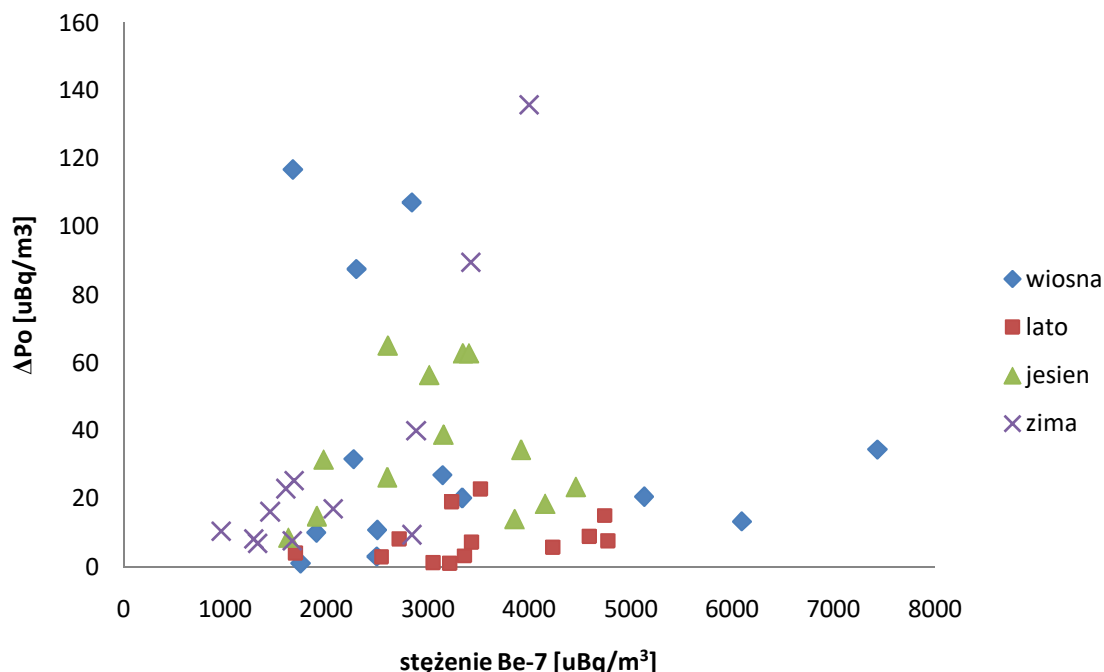
λ_{Po} – stała rozpadu promieniotwórczego [1/dzień].

Wyniki ilościowej analizy nadmiarowych porcji ^{210}Po , ^{210}Bi oraz ^{210}Pb do atmosfery zostały opisane w pracy [H1]. Średnio około 5% ^{210}Pb , 12% ^{210}Bi oraz aż 70% ^{210}Po pochodzi ze źródeł innych niż naturalny rozpad ^{222}Rn (Tabela 3).

Tabela. 3. Ilościowa ocena antropogenicznego udziału ^{210}Pb , ^{210}Po oraz ^{210}Bi (Δ_{Pb} , Δ_{Bi} , Δ_{Po}) w wybranych próbkach aerozoli [H1].

Kod próbki	X($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	$\Delta_{\text{Pb}}(\%)$	$\Delta_{\text{Bi}}(\%)$	$\Delta_{\text{Po}}(\%)$
1016	41,98	0,90	1,15	9,35
1017	1,57	1,94	13,85	97,0
1018	14,94	7,74	12,90	76,6
1019	18,51	0,85	1,36	20,1
1020	13,58	10,18	17,25	83,4
1120	23,7	6,26	11,38	77,3
1121	12,1	4,54	9,82	80,0
1122	7,7	1,83	2,76	30,5
1123	2,9	0,75	1,51	30,9
1124	7,2	2,08	5,20	71,0
1125	7,5	2,82	4,41	44,3
1126	3,5	1,42	2,11	23,9
1127	22,8	5,63	15,51	91,5
1128	19,0	5,34	15,42	91,9

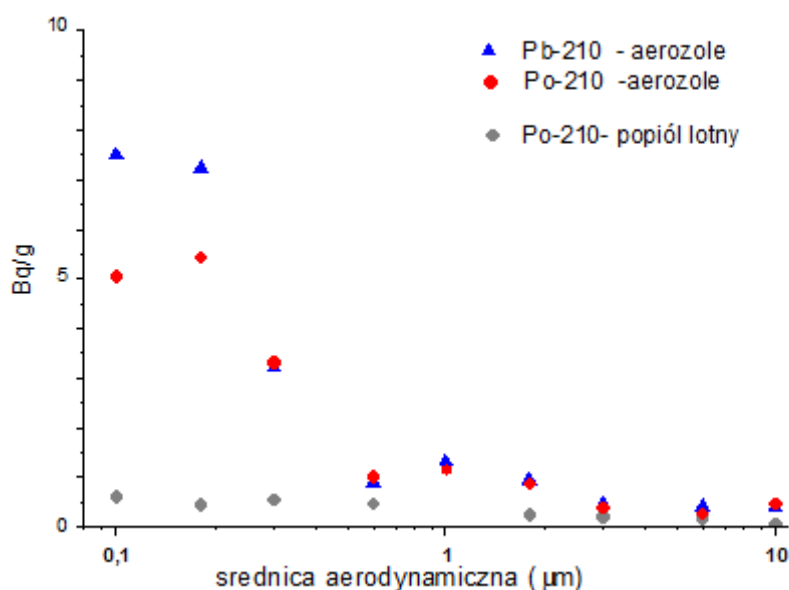
Badania zależności pomiędzy aktywnościami radionuklidów ^7Be lub ^{22}Na , a aktywnością ^{210}Po w powietrzu atmosferycznym w rejonie Łodzi nie wykazały istnienia tych korelacji (Rysunek 3.), co wyklucza udział dopływu stratosferycznego ^{210}Po w tym rejonie [H2, H9].



Rysunek 3. Zależność pomiędzy nadmiarową porcją ^{210}Po (Δ_{Po}), a stężeniem kosmogenicznego radionuklidu ^7Be w powietrzu.

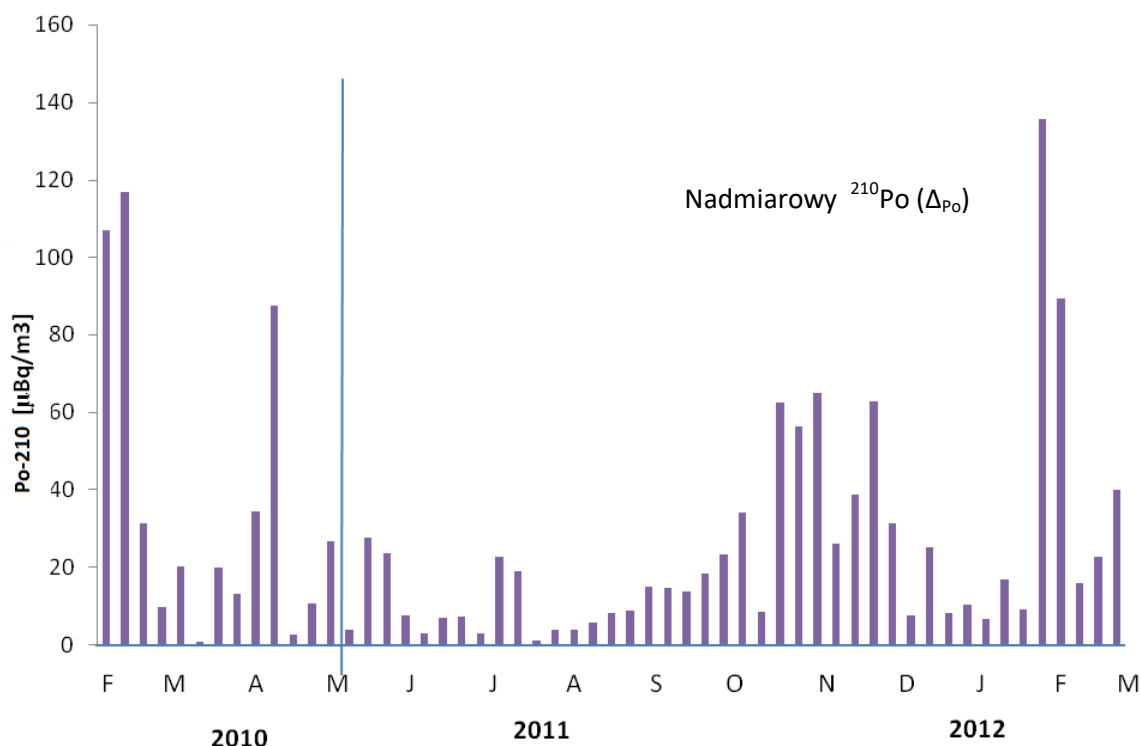
Brak korelacji (Rysunek 3), wykluczający dopływ stratosferycznego ^{210}Po [H1] wskazuje więc na istnienie dodatkowego, antropogenicznego źródła ^{210}Po w miejskiej atmosferze. Jako potencjalne źródła dodatkowych porcji ^{210}Po do atmosfery wstępnie wskazałam energetyczne spalanie węgla i resuspensję powierzchniowych warstw gleby (Nowina-Konopka M., 1993).

Znacznie wyższa lotność Po względem Pb, czy Bi (Hussain i inni 1995, Mora i inni, 2011) pozwala na swobodną ucieczkę znacznych ilości tego pierwiastka z układów kominowych zarówno w formie gazów odlotowych jak i popiołów lotnych, szczególnie o najdrobniejszych frakcjach rzędu $<1 \mu\text{m}$ (Rysunek 4).



Rysunek 4. Rozkład aktywności właściwych ^{210}Po i ^{210}Pb we frakcjonowanych aerozolach i popiołach lotnych [H5].

Zależnie od wydajności systemu odpylania miejskich elektrowni, czy elektrociepłowni ilość emitowanego do atmosfery ^{210}Po zmienia się w zakresie od 7 do około 300 GBq rocznie [H7]. Na terenie województwa łódzkiego funkcjonuje cały szereg elektrowni węglowych opalanych węglem kamiennym i brunatnym oraz tysiące kotłowni przydomowych bez jakichkolwiek systemów odpylania, które sumarycznie mogą dać emisję tego radionuklidu na poziomie ~ 1 TBq rocznie. Spalanie paliw kopalnych nie jest jedynym źródłem energii dostarczającym dodatkowych porcji radionuklidów do atmosfery. W całkowitym bilansie należy obecnie uwzględnić również inne alternatywne źródła energii, w postaci spalania paliw pochodzenia roślinnego, które ostatnio dodawane jest również w klasycznych elektrowniach węglowych. Wielosezonowe, systematyczne badania stężeń trzech radionuklidów: ^{210}Pb , ^{210}Bi i ^{210}Po w powietrzu pozwoliły mi nie tylko na wyznaczenie rzeczywistego czasu życia aerosoli w powietrzu, ale również po na ilościową ocenę nadmiarowego udziału izotopu ^{210}Po (unsupported ^{210}Po - ΔA_{Po} i jego źródeł [H5,H6].



Rysunek 5. Sezonowe zmiany stężenia nadmiarowego ^{210}Po (ΔPo) w atmosferze miejskiej [H5].

Rysunek 5 potwierdza sezonowe dostarczanie nadmiarowych porcji ^{210}Po do atmosfery związane z sezonowym energetycznym spalaniem węgla.

Uśrednione sezonowe wartości nadmiarowych (antropogenicznych) przyrostów aktywności ^{210}Po ΔA_{Po} w $\mu\text{Bq/m}^3$ oraz średnich rzeczywistych czasów życia aerozoli miejskich T_{RC} podają w Tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie sezonowych stężeń nadmiarowego ^{210}Po (ΔPo) [H5].

Pora roku	Zmierzony stosunek aktywności $A_{\text{Po}}/A_{\text{Pb}}$	Obliczony stosunek aktywności $A_{\text{tPo}}/A_{\text{Pb}}$	ΔA_{Po} [$\mu\text{Bq/m}^3$]	ΔA_{Po} [Bq/g]	T_{RC} [dni]
wiosna	0,072	0,023	$22,84 \pm 12,04$	0,406	8,27
lato	0,055	0,028	$8,80 \pm 4,76$	0,257	10,75
jesień	0,055	0,021	$35,53 \pm 16,71$	0,545	8,21
zima	0,092	0,026	$42,46 \pm 36,13$	0,608	10,17

Jak widać w tabeli 4. w intensywnym okresie grzewczym (zima) przyrost ten jest prawie 5-krotnie wyższy, niż w okresie letnim. Dalszym, bezpośrednim potwierdzeniem dodatkowej,

antropogenicznej emisji ^{210}Po jest porównanie aktywności właściwych tego radionuklidu w różnych składnikach miejskiego pyłu zawieszonego (Tabela 5).

Tabela 5. Zawartość ^{210}Po w różnych próbkach środowiskowych .

Rodzaj próbki	Aktywność właściwa ^{210}Po [Bq/g]
Całkowity pył zawieszony TSP lato zima	0,54 ±0,17 0,79±0,32
Pył frakcjonowany <0.3 µm	4,71±1,6
Popiół lotny (schwytyany przez elektrofiltry)	0,264±0,016
Popiół z procesów odlewniczych	0,522±0,023
Gleba powierzchniowa	0,029±0,003 (na podstawie aktywności ^{210}Pb)
Spaliny samochodowe	0,129

Wstępne badania fizykochemicznej formy ^{210}Po emitowanego z kominów elektrociepłowni wykazały istotny udział związków Po nie związanych z emitowanymi pyłami. Pochłanianie atmosferycznego polonu w serii cieczowych absorbentów wykazało następujący podział (Tabela 6) [H5].

Tabela 6. Stężenie ^{210}Po w formie związanej („attached”) i niezwiązanej („unattached”) zbadane w atmosferze w rejonie elektrociepłowni miejskiej.

Miejsce poboru	Sampling date	$A^{210}\text{Po}$ związany [mBq/m ³]	$A^{210}\text{Po}$ niezwiązany [mBq/m ³]	$\frac{A^{210}\text{Po niez.}}{A^{210}\text{Po zw.}}$
Łódź centrum	maj 2013	0,066	0,196	2,97
Łódź centrum	wrzesień 2013	0,146	0,275	1,88
Łódź przedmieścia	wrzesień 2013	< LD ¹	0,005	-

¹LD-Limit detekcji

Dane literaturowe (Papastefanou, 2010; Mljač i Križman, 2004) wskazują, iż nawet do 60% radionuklidów ucieka z elektrowni węglowych poprzez systemy odpylania. Badania amerykańskie wskazują (Tadmor, 1986) iż 32% ^{210}Pb ucieka w formie gazowej lub w formie drobnych frakcji pyłowych. Biorąc pod uwagę ponad 1000 krotnie większą prędkość

par pierwiastkowego Po w temperaturze spalania 1000 stopni C zdecydowanie większa ilość ^{210}Po względem ^{210}Pb emitowana jest do atmosfery w fazie niezwiązanej. Moje dotychczasowe badania wykazały, iż nawet 50% ^{210}Po zawartego w spalonym węglu ucieka do atmosfery. Pozostała część kondensuje na popiołach lotnych i w rejonie układów odpylających [H6]. Wyniki z wykonanych analiz zamieszczono w Tabeli 6.

Hipotezę o emisji dodatkowych porcji ^{210}Po do atmosfery np. ze spalania paliw pochodzenia roślinnego potwierdzają badania emisji tego izotopu i stosunku radionuklidów $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ w popiołach lotnych i gazach powstających w trakcie pożarów lasów. W ostatnich latach tego typu analizy zostały opublikowane kilkakrotnie (Bem i inni, 1998; Bem, 2005; Ram i Sarin, 2012; Carvalho i inni, 2011; Kim i inni 2011). Z badań tych wynika, że średnie stężenie aktywności ^{210}Po w drzewie i liściach dębu wynosiły 5,5 i 30,8 Bq/kg, podczas gdy w drzewie i igłach sosny były one na poziomie odpowiednio 2 i 10,4 Bq/kg. Natomiast w popiołach lotnych powstałych w wyniku pożaru lasu składającego się z tych drzew wartość aktywności ^{210}Po sięgała aż 7255 Bq/kg (stosunek $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ na poziomie 3,5), co znacznie przekracza wartości odnotowane w popiołach lotnych powstałych po spalaniu paliw kopalnych w tradycyjnych kotłach wysokotemperaturowych (Carvalho i inni, 2014). Niższa zawartość ^{210}Po , czy ^{210}Pb w materiale drzewnym, czy energetycznych produktach pochodzenia roślinnego w porównaniu z węglu kamiennym może po procesie spalania dać podobne wartości ich emisji do środowiska w przeliczeniu na jednostkę otrzymanej energii, ze względu na niższą ich kaloryczność.

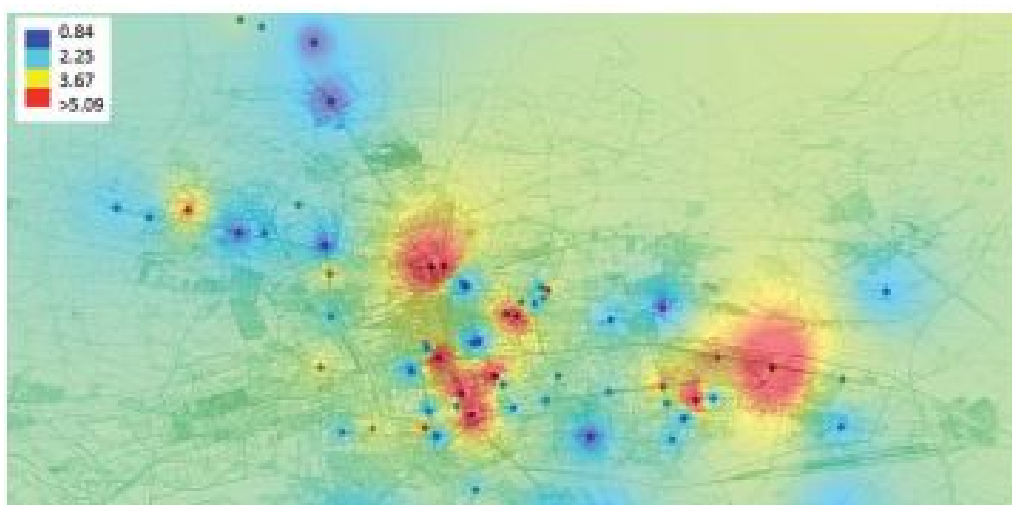
Również niektóre rośliny np. tytoniowe, wykazują szczególne predyspozycje w kumulowaniu metali ciężkich, w tym radionuklidów ^{210}Po , czy ^{210}Pb , poprzez dużą powierzchnię liści. Palenie tytoniu okazuje się być jednym z najistotniejszych źródeł transferu ^{210}Po i związków gazowych do organizmu człowieka i tym samym może podwyższać prawdopodobieństwo zachorowań na nowotwory płuc (Skwarzec i inni, 2001).

VIII. WYKORZYSTANIE BIOMONITORINGU DO OCENY ŹRÓDEŁ EMISJI ^{210}PO W TERENIE ZURBANIZOWANYM

Potwierdzenie antropogenicznych źródeł emisji wniosły badania z zastosowaniem metody biomarkerów w tym głównie mchów i porostów. W ramach tych badań dokonałam analizy rozkładu stężeń dwóch radionuklidów ^{210}Pb i ^{210}Po w wybranych biomarkerach: mchach *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune* i porostach z gatunku *Hypogymnia physodes*. W mchach aktywności radionuklidów zależą od możliwości akumulacyjnych

poszczególnych części morfologicznych biomarkera (Fonollosa i inni, 2015; Boryło i inni, 2012; Sert i inni, 2011, Ugur i inni, 2004).

W trakcie prac zostało przeanalizowanych ponad dwieście próbek mchów, które pozwoliły na ocenę źródeł ^{210}Po w powietrzu w regionie aglomeracji łódzkiej. Do graficznej wizualizacji rozkładu ^{210}Po został zastosowany wskaźnik kontaminacji zdefiniowany jako stosunek stężenia aktywności ^{210}Po w mchu pobranego z aglomeracji miejskiej i stężenia tego izotopu w próbce pobranej z regionu o relatywnie niskim udziale zanieczyszczeń w atmosferze (gęsty las oddalony od zabudowań) [H4].



Rysunek 6 . Mapa aglomeracji Łódzkiej z naniesionym wskaźnikiem kontaminacji [H4].

Zaprezentowana mapa (Rysunek 6) potwierdza istnienie lokalnych źródeł emisji ^{210}Po do atmosfery. Wskazane na czerwono regiony to obszary nagromadzenia osiedli stosujących kotłownie przydomowe lub regiony opadu popiołów lotnych emitowanych z usytuowanych w centrum elektrociepłowni.

Zarówno stężenie ^{210}Pb jak i ^{210}Po wykazują charakterystyczne tendencje, przy czym największe ich zawartości, sięgające nawet wartość 850 Bq/kg, zidentyfikowałam w chwytnikach mchów. Stosunki stężenia $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ wykazują sezonowe zmiany, co wskazuje na różny udział źródeł emisji tych izotopów w okresie letnim i zimowym. W przypadku gatunku porostu największe stężenie ^{210}Po sięgające około 250 Bq/kg zidentyfikowano we fragmentach plechy o największej powierzchni [H4].

Poszczególne fragmenty mchów i porostów wykazują różną zdolność akumulowania pierwiastków pobieranych z atmosfery. Na podstawie przeprowadzonych analiz można wnioskować, iż rozkład stężeń w sposób istotny zmienia się wraz ze zmianą sezonowych udziałów źródeł emisji oraz transportem składników mineralnych w obrębie rośliny.

W sezonie letnim średnio około 30% ^{210}Po względem ^{210}Pb zdeponowane jest w listkach, natomiast w okresie zimowym udział ^{210}Po podwaja się. Dla odmiany w chwytnikach w okresie lata obserwuje się średnio 30% nadwyżkę aktywności ^{210}Po względem ^{210}Pb . Zimą ta tendencja redukuje się [H4] .

Najlepsze możliwości akumulacyjne metali wykazują chwytniki, podczas gdy to listki odpowiadają za pobór składników odżywczych. W przypadku porostów najefektywniejsze pozyskiwanie składników wykazują duże fragmenty plechy.

IX. PODSUMOWANIE

Reasumując, do najważniejszych osiągnięć i elementów nowości naukowej wynikających z przeprowadzonych badań, zaliczam:

1. Samodzielne zbudowanie unikatowego stanowiska do badań transportu aerozoli atmosferycznych, w tym oceny źródeł zanieczyszczeń głównie radionuklidami ^{210}Po i ^{210}Pb . Stanowisko zostało wyposażone w sprzęt dzięki uzyskaniu finansowania z Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu SONATA, którego jestem kierownikiem i głównym wykonawcą.
2. Opracowanie nowej metody oceny rzeczywistego (skorygowanego) czasu przebywania aerozoli w atmosferze [H1, H5, H7, H8] oraz wykorzystanie jej w sytuacji rzeczywistego zdarzenia radiacyjnego do oceny transportu aerozoli promieniotwórczych po awarii w Fukushima w 2011 roku [H2].
3. Oszacowanie nadmiarowego udziału ^{210}Po i ^{210}Pb w powietrzu miejskim (na przykładzie aglomeracji łódzkiej) oraz ocena źródeł emisji tych radionuklidów [H1, H5].
4. Opracowanie bilansu stężenia radionuklidów ^{210}Pb i ^{210}Po w procesie spalania na przykładzie trzech kompleksów elektrociepłowni tj. zespołu elektrociepłowni łódzkich, elektrociepłowni w Chorzowie i Bełchatowie. Wyniki wskazują, iż średnio około 50% aktywności ^{210}Po zawartego w węglu nie jest zatrzymana w żużlu lub schwytych przez elektrofiltry popiołach lecz wydostaje się poza układ kominowy, pomimo stosowania systemów odpylających [H6].
5. Rozwiązanie szeregu problemów metodycznych związanych z oznaczeniem niskich stężeń radionuklidów w niewielkich próbkach środowiskowych, w tym problemu

samoabsorpcji niskoenergetycznego promieniowania gamma ^{210}Pb [H3], radiochemicznej separacji radionuklidów [H1] oraz optymalnego doboru trybu pomiarowego [H9].

6. Utworzenie i kierowanie zespołem specjalizującym się w stosowaniu metod izotopowych w badaniach o charakterze radioekologicznym (klasyczny monitoring radiacyjny atmosfery, monitoring z zastosowaniem biomarkerów, radiometryczne badanie wód, gleb, odpadów przemysłowych i kopalnianych) oraz wszechstronną ochroną radiologiczną.
7. Zrealizowane autorskie badania włączone w skład dzieła habilitacyjnego [H1-H9] oraz inne [załącznik 6, punkt II, prace A1-A7 oraz B1-B4] poszerzyły wiedzę na temat wykorzystania naturalnych znaczników promieniotwórczych do badań transportu w atmosferze. Potwierdzeniem wysokiego poziomu badań i kompetencji habilitantki było opublikowanie autorskiego artykułu przeglądowego w renomowanym czasopiśmie **Environment International** [H8] o wskaźniku IF równym **5,929**.

X. NAJBLIŻSZE PLANY BADAWCZE

- a) Zastosowanie sprawdzonej metody monitoringu radiacyjnego ze szczególnym uwzględnieniem oceny udziałów źródeł zanieczyszczeń i ich transportu w atmosferze w warunkach podwyższonych stężeń zanieczyszczeń pyłowych (smog)- prace w toku.
- b) Badanie stężenia ^{222}Rn w próbkach wód pitnych i powietrzu w budynkach, opracowanie nowych metod poboru próbek i optymalizacja pomiarów metodą ciekło scyntylacyjną-prace w toku.
- c) Badanie stężenia alfa-promieniotwórczego ^{210}Po we włosach oraz statystyczna ocena czynników warunkujących jego udział w organizmie człowieka oraz ocena narażenia radiologicznego i potencjalnych skutków zdrowotnych-prace w toku.
- d) Opracowaniu systemu wzorcowania sprzętu spektrometrycznego do pomiarów próbek środowiskowych oraz udział w krajowych i międzynarodowych pomiarach porównawczych.
- e) Przygotowanie laboratorium metod izotopowych do akredytacji PCA oraz pełnienie funkcji kierownika do spraw jakości (organizacja pracy laboratorium, przygotowanie dokumentacji, zdobycie uprawnień audytora wewnętrznego, etc.)-prace w toku.

- f) Włączenie laboratorium w międzynarodową sieć ALMERA koordynowaną przez IAEA, skupiającą laboratoria stosujące nowoczesne techniki spektrometryczne i odznaczające się doskonałą precyzją oznaczeń.

XI. LITERATURA:

- Al-Masri MS, Al-Karfan K, Khalili H, Hassan M., 2006. Speciation of ^{210}Po and ^{210}Pb in air particulates determined by sequential extraction, *Journal of Environmental Radioactivity*, 91(1-2),103-12.
- Al-Masri M.S., Haddad Kh., Doubal A.W., Awad I., Al-Khatib Y., 2014. Assessment of soil contamination by ^{210}Po and ^{210}Pb around heavy oil and natural gas fired power plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 132, 89-93.
- Anand S., Mayya Y.S.,2015. Coagulation effect on the activity size distributions of long lived radon progeny aerosols and its application to atmospheric residence time estimation techniques. *Journal of Environmental Radioactivity*, 141, 153-163.
- Baskaran M., Shaw G.E., 2001. Residence time of arctic haze aerosols using the Concentrations and activity ratios of Po-210, Pb-210 and Be-7, *Journal of Aerosol Science*, 32, 443-452.
- Bem E.M., Bem H., Wieczorkowski P., 1998. Studies of radioactive concentrations in surface soil in and around fly ash disposal sites. *Science of the Total Environment*, 220, 215-222.
- Bem H., 2005, *Radioaktywność w środowisku naturalnym*, Polska Akademia Nauk, Oddział w Łodzi, Łódź.
- Boryło A., Nowicki W., Olszewski G. I inni, 2012. Polonium (^{210}Po), uranium (^{234}U , ^{238}U) isotopes and trace metals in mosses from Sobieszewo Island, northern Poland, *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 47(12),1831-42.
- Carvalho F.P., Oliveira J.M., Malta M., 2014. Exposure to radionuclides in smoke from vegetation fires, *Science of the Total Environment*, 472, 421–424.
- Carvalho F.P.,1995. Origins and concentrations of ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po in the surface air at Lisbon, Portugal, at the Atlantic edge of the European continental landmass, *Atmospheric Environment*, 29,15,1809-1819.

- Carvalho F.P., Oliveira J.M., Malta M., 2011. Vegetation fires and release of radioactivity into the air. In: Environmental Health and Biomedicine. WIT Transactions on Biomedicine and Health, 15, WIT Press, UK. 3-9.
- Daish S.R., Dale A.A., Dale C.J., May R., Rowe J.E., 2005. The temporal variations of ^7Be , ^{210}Pb and ^{210}Po in air in England, Journal of Environmental Radioactivity, 84, 457-467.
- Duenas C., Fernandez M.C., Carretero J., Liger E., Canete S., 2004. Long-term variation of the concentrations of long-lived Rn descendants and cosmogenic ^7Be and determination of the MRT of aerosols, Atmospheric Environment, 38, 1291–1301.
- Fonollosa E., Peñalver A., Aguilar C., Borrull F., 2015. Polonium-210 levels in different environmental samples, Environmental Science and Pollution Research, 22, 24, 20032-20040.
- Gjelsvik R., Brown J., Holm E., Roos P., Saxen R. and Outola I., 2012. Polonium-210 and other radionuclides in terrestrial, freshwater and brackish environments. Results from the NKS project GAPRAD (Filling knowledge gaps in radiation protection methodologies for non-human biota), Norwegian Radiation Protection Authority, Stralevern Report, 2012:3.
- Harrison J., Leggett R., Lloyd D., Phipps A., Scott B., 2007. Polonium-210 as a poison. Journal of Radiological Protection, 27:17–40.
- Hussain N., Ferdelman T. G., Church T. M., Luther III G.W., 1995. Bio-volatilization of polonium: Results from laboratory analyses. Aquatic Geochemistry, 1, 2, 175-188.
- Jefferson R.D., Goans R.E., Blain P.G., Thomas S.H.L., 2009. Diagnosis and treatment of polonium poisoning. Clinical Toxicology, Philadelphia, 47,379–392.
- Jia G., Jia J., 2014. Atmospheric residence times of the fine-aerosol in the region of south Italy estimated from the activity concentration ratios of $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ in air particulates, Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques, 5,5,1-9.
- Kim G, Kim T, Church TM. 2011. Po-210 in the environment: Biogeochemical cycling and bioavailability. In: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Part 2 Berlin:Springer-Verlag, 271–284.
- Khater A.E.M., Bakr W.F., 2011. Technologically enhanced ^{210}Pb and ^{210}Po in iron and steel industry, Journal of Environmental Radioactivity, 102, 527-530.
- Karangelos, D.J., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E., 2004. Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the

- ashes produced in lignite-fired power plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 77, 233-246.
- Kim G., Hussain N. and Church T. M., 2000. Excess ^{210}Po in the coastal atmosphere, *Tellus*, 52B, 74–80.
- Lambert G., Sanak J., Polian G., 1983. Mean residence time of submicrometer aerosols in the global troposphere. *Precipitation Scavenging, Dry Deposition and Resuspension, Proceedings 2*:1353–1359.
- Lambert G., Sanak J., Polian G., 1982. Volcanic output of long-lived radon daughters, *Journal of Geophysical Research: Oceans* 87, C13, 11103–11108.
- McNeary, D., Baskaran, M., 2007. Residence times and temporal variations of ^{210}Po in aerosols and precipitation from southeastern Michigan, United States. *Journal of Geophysical*, 112, D42007, D04208, 1-11.
- Moore, H.E., Poet, S.E., Martell, E.A., 1973. ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi , and ^{210}Po profiles and aerosol residence times versus altitude, *Journal of Geophysical Research*, 78, 7065-7075.
- Moore, H.E., Martell, E.A., and Poet, S.E., 1976. Sources of Polonium-210 in atmosphere, *Environmental Science & Technology*, 10, 586, 586–591.
- Mora J.C., B. Robles, Corbacho J.A., Gascóa C., Gázquez M.J., 2011. Modelling the behaviour of ^{210}Po in high temperature processes, *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 520-526.
- Nho E.-Y., Ardouin B., Le Cloarec M. F. and Ramonet M., 1996. Origins of ^{210}Po in the atmosphere at Lamto, Ivory coast: biomass burning and saharan dusts, *Atmospheric Environment*, 30, 22, 3705-3714.
- Nowina-Konopka M., 1993. Radiological Hazard from Coal-Fired Power Plants in Poland, *Radiation Protection Dosimetry*, 46, 3, 171-180.
- Papastefanou, C. 2006. Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 93–100.
- Papastefanou C. 2010. Escaping radioactivity from coal-fired power plants (CPPs) due to coal burning and the associated hazards: a review, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 191–200.
- Persson B.R.R. and Holm E., 2011. Polonium-210 and lead-210 in the terrestrial environment: a historical review, *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 420-429.
- Persson B.R.R., Holm E., 2014. ^7Be , ^{210}Pb , and ^{210}Po in the surface air from the Arctic to Antarctica, *Journal of Environmental*, 138, 364-374.

- Persson B.R.R., 2014. ^{210}Po and ^{210}Pb in the Terrestrial Environment, *Current Advances in Environmental Science CAES*, 2 (1), 22-37.
- Poet S.E., Moore H.E., Martell E.A., 1972. Lead-210 Bismuth-210 and Polonium-210 in the atmosphere: accurate ratio measurement and application to aerosol residence time determination, *Journal of Geophysical Research*, 77:33, 6515–6527.
- Ram K. and Sarin M.M., 2012. Atmospheric ^{210}Pb , ^{210}Po and $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ activity ratio in urban aerosols: temporal variability and impact of biomass burning emission, *Tellus B* 64, 17513.
- Seiler R.L., Wiemels J.L., 2012. Occurrence of ^{210}Po and biological effects of low-level exposure: the need for research, *Environmental Health Perspectives*, 120, 9, 1230-1237.
- Sert E., Ugur A., Özden B., Saç M.M., Camgöz B., 2011. Biomonitoring of ^{210}Po and ^{210}Pb using lichens and mosses around coal-fired power plants in Western Turkey, *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 535-542.
- Silva A.A 2007. Seasonal variations of Pb214 and Po210 concentrations in the surface air in São José dos Campos (23.18° S, 45.89° W, 600 m asl) Brazil, *Atmospheric Research*, 86, 1, 88–92.
- Skwarzec B., Ulatowski J., Strumińska D.I., Boryło A., Inhalation of ^{210}Po and ^{210}Pb from cigarette smoking in Poland, *Journal of Environmental Radioactivity*, 57, 221-230, 2001.
- Tadmor J. Atmospheric release of volatilized species of radioelements from coal-fired plants, *Health Physics*, 1986;50:270–273.
- Ugur A., Özden B., Saç M. M., Yener G., Altınbaş Ü., Kurucu Y., Bolca M., 2004. Lichens and mosses for correlation between trace elements and 210 Po in the areas near coal-fired power plant at Yatağan, Turkey, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 259, 1, 87–92.
- Ugur A., Özden B., Filizok I., 2011. Determination of ^{210}Po and ^{210}Pb concentrations in atmospheric deposition in Izmir (Aegean sea-Turkey), *Atmospheric Environment*, 45, 4809-4813.
- UNSCEAR 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Annex B, Exposures from natural radiation sources.
- Wallner G., Berner A., Irlweck K., 2002. Aerosols: unexpected disequilibrium phenomena between airborne radio activities of lead-210 and its progenies bismuth-210 and polonium-210, *Naturwissenschaften*, 89, 569–574.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Zastosowanie radionuklidów ^{210}Po i ^{210}Pb jako znaczników to główna, ale nie jedyna część mojej działalności naukowej.

Przed doktoratem:

1. W badaniach stosuję regularnie metody monitoringu powietrza, stąd od 2008 roku współpracuję z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej oraz Państwową Agencją Atomistyki w zakresie obsługi stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych w przyziemnej warstwie atmosfery.
2. Regularne analizy zawartości naturalnych radionuklidów w pyłach frakcjonowanych pozwoliły na ocenę narażenia radiologicznego mieszkańców regionu uprzemysłowionego (na przykładzie miasta Opoczna). Tego rodzaju rozważania zostały ujęte w formie artykułu monograficznego opublikowanego w książce „Na pograniczu biologii i chemii” [B1].
3. Obok monitoringu atmosfery obiektem moich badań było również środowisko wodne, stąd w 2009 i 2010 roku włączyłam się w cykl badań naturalnych radionuklidów ^{228}Ra (^{228}Ac), ^{226}Ra (^{222}Rn), ^{224}Ra , ^{210}Pb i ^{228}Th w wodach geotermalnych [A2] oraz ^{210}Pb i ^{137}Cs w profilach osadów dennych [A3].
4. Nawiązanie współpracy z producentami wyrobów ceramicznych głównie z regionu Opoczna pozwoliło na ocenę narażenia radiologicznego związanego ze stosowaniem ceramiki jako materiałów wykończeniowych w budynkach mieszkalnych [B2].

Po doktoracie:

5. Badania w zakresie monitoringu radionuklidów w atmosferze zarówno w warunkach obecności zanieczyszczeń pyłowych, wynikających z energetycznego spalania węgla, jak i w sytuacji napływu aerozoli promieniotwórczych po awarii w Fukushima zyskały szerokie uznanie. Konsekwencją było zaproszenie mnie do międzynarodowego zespołu badającego zachowanie zarówno sztucznych jak i naturalnych radionuklidów w tym ^{210}Pb w powietrzu w większych miastach Europy w 2012 roku. Wyniki badań uzyskane w ramach współpracy kilku laboratoriów radiometrycznych zostały opublikowane w pracy [A4].
6. Niezależnie prowadziłam szereg badań stężenia ^{222}Rn w wodzie oraz powietrzu, a także ekshalacji tego radionuklidu z różnych materiałów budowanych. Tego rodzaju badania były realizowane w ramach prac inżynierskich przygotowywanych pod moim

kierunkiem w 2015 roku. Dwie z prac realizowane były w ramach współpracy z Instytutem Medycyny Pracy, spośród których jedna zaowocowała wspólnym artykułem [B6].

7. Ogłoszenie Dyrektywy EUROATOM w 2013 roku nakładającej obowiązek regularnych pomiarów stężenia ^{222}Rn w wodzie i powietrzu oraz jej aplikacja do krajowego prawa atomowego skłoniły mnie do wstąpienia do Centrum Radonowego, skupiającego polskich naukowców zajmujących się szeroko rozumianą problematyką radonową. W ramach tego Centrum brałam udział w dwóch interkalibracjach dotyczących oznaczania ^{222}Rn w powietrzu i w wodzie.
8. Udział w pomiarach porównawczych traktuję jako warunek konieczny zachowania dobrej jakości przeprowadzanych analiz, stąd regularnie biorę udział w tego typu przedsięwzięciach organizowanych zarówno przez krajowe instytuty: Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, jak i zagraniczne Międzynarodową Agencję Energii Atomowej - IAEA (Austria), czy National Institute of Radiological Sciences - NIRS (Japonia).
9. Prywatne zainteresowania paleontologią i geologią zaowocowały nawiązaniem współpracy z głównymi muzeami geologicznymi w kraju, w tym łódzkim. Kierownik muzeum geologicznego w Łodzi zaprosił mnie do udziału i wygłoszenia referatu na temat aspektów prawnych eksponowania i przechowywania minerałów promieniotwórczych. Obok zaprezentowanego referatu przygotowałam również artykuł będący formą poradnika dla pracowników muzeum dotyczący zasad pozyskiwania, magazynowania i eksponowania minerałów promieniotwórczych. Tematyka wykładu jak i treść artykułu wzbudziła ogromne zainteresowanie, czego konsekwencją było wystosowanie przeze mnie zaproszenia zainteresowanych muzeów geologicznych do pomiarów stężenia ^{222}Rn w pomieszczeniach wystawienniczych i magazynach minerałów. Wykonane przeze mnie serie pomiarowe pozwoliły na oszacowanie narażenia radiologicznego pracowników muzeów mających bezpośredni kontakt z eksponowanymi i przechowywanymi minerałami promieniotwórczymi. Podsumowanie tych pomiarów zostało ujęte w formie artykułu [A8].
10. Obok dwóch kilkumiesięcznych staży w wiodących ośrodkach naukowych (w Uniwersytecie w Sewilli oraz ENEA w Rzymie), odbyłam również półroczny staż z zakresu analizy radionuklidów w materiałach ceramicznych w ramach projektu Transfer strzałem w dziesiątkę, w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.

Zrealizowanie tego rodzaju stażu we współpracy Politechniki Łódzkiej oraz prywatnej firmy dało mi możliwość zastosowania zdobytej wiedzy w praktycznej analizie nowych materiałów ceramicznych przygotowywanych do regularnej dystrybucji. Pomiarów spektrometrycznych materiałów gęstych, wiąże się z utrudnieniami w zakresie oceny wydajności detekcji, stąd opracowałam metodę jej korekcji opisaną w pracy [A5] oraz doboru optymalnego trybu pomiarowego [A7].

11. Już w trakcie swoich studiów doktoranckich, a później w czasie zatrudnienia samodzielnie pozyskiwałam środki na prowadzenie badań: ze środków Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa, oraz dwukrotnie z Funduszu Młodych Naukowców Wydziału Chemicznego Politechniki Łódzkiej. W 2016 roku otrzymałam stypendium habilitacyjne przyznawane przez Rektora PŁ dla młodych naukowców przed 35 rokiem życia z Uczelnianego Funduszu Stypendialnego. Ponadto, zrealizowałam również w sumie 8 niezależnych projektów z zakresu badań o charakterze podstawowym lub stosowanym na łączną kwotę przekraczającą: 1 000 000,00 PLN.
12. Całościowo w skład mojego dorobku naukowego wchodzi **22** oryginalnych prac, które powstały na przestrzeni ostatnich 6-ciu lat o sumarycznym wskaźniku IF: (liczonym na rok wydania pracy **32,5** przy sumie punktów ministerialnych **469**). Potwierdzeniem mojej samodzielności naukowej jest fakt, iż spora część prac została opracowana przeze mnie w sposób całkowicie samodzielny (**7 prac monoautorskich**), bądź z moim znacznym udziałem (**10 prac z udziałem 90%**). Uczestniczyłam w szeregu konferencji krajowych i zagranicznych, podczas których wygłosiłam: **20 komunikatów ustnych, 2 wykłady zaproszone oraz zaprezentowałam 31 posterów.**

Zugosliska