



## **II Sympozjum Polskiego Konsorcjum Ochrony Radiologicznej**

**Ochrona radiologiczna wobec współczesnych wyzwań:  
człowiek, bezpieczeństwo, energia i środowisko**

*Streszczenia wystąpień i prezentacji*

Politechnika Gdańska,  
17 czerwca 2025  
Gdańsk

## **Komitety Naukowe II Sympozjum Polskiego Konsorcjum Ochrony Radiologicznej**

dr hab. Beata Brzozowska, prof. UW  
*Zakład Fizyki Biomedycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski*

dr hab. Kamil Brzóska, prof. IChTJ  
*Centrum Radiobiologii i Dozymetrii Biologicznej, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie*

prof. dr hab. inż. Maciej Budzanowski  
*Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego, Polskiej Akademii Nauk w Krakowie*

dr Michał Gryziński  
*Narodowe Centrum Badań Jądrowych*

prof. dr hab. Janusz Janeczek  
*Instytut Nauk o Ziemi, Wydział Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Śląski w Katowicach*

dr hab. inż. Aleksandra Jung, prof. AGH  
*Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie*

dr inż. Dariusz Kluszczyński  
*Krajowe Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia*

dr Paweł Krajewski  
*Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie*

dr hab. Bogusław Michalik, prof. GIG  
*Śląskie Centrum Radiometrii Środowiskowej im. Marii Goeppert Mayer, Państwowy Instytut Badawczy, Główny Instytut Górnictwa*

prof. dr hab. Paweł Moskal  
*Zespół Zakładów Fizyki Jądrowej, Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie*

dr hab. Paweł Możejko, prof. PG – Przewodniczący Komitetu Programowego  
*Instytut Fizyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska*

prof. dr hab. inż. Paweł Olko – Zastępca Przewodniczącego Komitetu Programowego  
*Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego, Polskiej Akademii Nauk w Krakowie*

dr hab. Jerzy Olszewski, prof. IMP  
*Zakład Ochrony Radiologicznej, Instytut Medycyny Pracy w Łodzi*

prof. dr hab. n. med. Tomasz Piotrowski  
*Zakład Fizyki Medycznej, Wielkopolskie Centrum Onkologii*

Prof. dr hab. Bogdan Skwarzec  
*Katedra Chemii i Radiochemii Środowiska, Wydział Chemii UG*

dr hab. inż. Piotr Tulik, profesor PW  
*Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska*

## **Komitet Organizacyjny II Sympozjum Polskiego Konsorcjum Ochrony Radiologicznej**

dr Brygida Mielewska, prof. PG - Przewodnicząca Komitetu Organizacyjnego

dr hab. inż. Aleksandra Mielewczyk-Gryń, prof. PG

dr inż. Patryk Jasik

mgr Anna Manasterska

## **Organizatorzy II Sympozjum PKOR:**

**Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej**



**Politechnika Gdańska**



**Polskie Konsorcjum Ochrony Radiologicznej**



**Patronat:**



**JM Rektora Politechniki Gdańskiej**

**Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej**

## Program Sympozjum:

09:00 → 09:30 Rejestracja uczestników - Hol przed Aulą (Gmach Główny)  
09:30 → 09:35 Otwarcie II spotkania PKOR - Gmach Główny, Aula PG  
09:35 → 09:45 *Strategiczna Agenda Badawcza Ochrony Radiologicznej w Polsce*  
Paweł Olko (Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie)

09:45 → 11:00 Sesja 1 - Gmach Główny, Aula PG

09:45 *Radiobiologiczne podstawy retrospektywnej dozymetrii biologicznej*  
Kamil Brzóska (Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie)  
10:00 *Bezpieczeństwo energetyki jądrowej - dla których specjalistów w ochronie zdrowia jest ono wyzwaniem?*  
Wojciech Cytawa (Zakład Medycyny Nuklearnej, Wydział Nauk o Zdrowiu, Gdański Uniwersytet Medyczny)  
10:15 *Detektory TL w środowisku.*  
Maciej Budzanowski (Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie)  
10:30 *Praca z otwartymi źródłami promieniotwórczymi - możliwości i ograniczenia w pracy dydaktycznej i naukowej.*  
Joanna Dudała (Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie)  
10:45 *Energetyka jądrowa w Polsce, perspektywy rozwoju i obawy.*  
Alicja Boryło (Wydział Chemii, Uniwersytet Gdański)

11:00 → 11:30 Przerwa kawowa - Hol przed Aulą PG (Gmach Główny)

11:30 → 13:00 Sesja 2 - Gmach Główny, Aula PG

11:30 *Kto pierwszy, ten silniejszy? O radiacyjnych uszkodzeniach DNA i ich naprawie w komórkach.*  
Beata Brzozowska (Zakład Fizyki Biomedycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski)  
11:45 *Dozymetria retrospektywna - wyzwania i perspektywy w ujęciu praktycznym i naukowym.*  
Aleksandra Jung (Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie)  
12:00 *Pomiary skażeń radioaktywnych w Arktyce.*  
Edyta Łokas (Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie)  
12:15 *Identyfikacja odległych źródeł emisji skażeń na podstawie pomiarów radioaktywności powietrza.*  
Jerzy Mietelski (Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie)  
12:30 *Projektowanie i badanie materiałów osłonowych i konstrukcyjnych dla energetyki jądrowej z uwzględnieniem zjawiska starzenia radiacyjnego i ochrony radiologicznej.*  
Michał Gryziński (Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk)  
12:45 *Wybrane problemy oceny oddziaływania na środowisko obiektów jądrowych w warunkach normalnej eksploatacji.*  
Paweł Krajewski (Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie)

13:00 → 14:00 Przerwa obiadowa - Dziedziniec Heweliusza, Gmach Główny PG

14:00 → 15:45 Sesja 3 - Gmach Główny, Aula PG

14:00 *Modelowanie Monte Carlo transportu i oddziaływania promieniowania jonizującego z wykorzystaniem antropomorficznych fantomów meshowych.*  
Edyta Michaś-Majewska (Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku)  
14:15 *Radon, a elektrownie jądrowe.*  
Jerzy Olszewski (Instytut Medycyny Pracy w Łodzi)  
14:30 *Dozymetria w skali nano, czyli jak policzyć uszkodzenia DNA.*  
Marcin Pietrzak (Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku)  
14:45 *Wpływ współwystępowania szkodliwych czynników fizycznych i chemicznych na zagrożenie radiacyjne w środowisku.*  
Bogusław Michalik (Śląskie Centrum Radiometrii Środowiskowej, Państwowy Instytut Badawczy, Główny Instytut Górnictwa)

- 15:00 *Dostępne rozwiązania techniczne służące ograniczeniu stężenia radonu w miejscach pracy.*  
Katarzyna Wołoszczuk (Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie)
- 15:15 *Narażenia medyczne w Polsce.*  
Dariusz Kluszczyński (Krajowe Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia w Łodzi)
- 15:30 *Wykorzystanie nowoczesnych jądrowych bloków energetycznych do produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu z ciepłem.*  
Marcin Jaskólski (Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska)
- 15:45 → 16:15 Przerwa kawowa - Hol przed Aulą PG (Gmach Główny)
- 16:15 → 17:45 Dyskusja, wolne wnioski i podsumowanie spotkania - Gmach Główny, Aula PG

# Strategiczna Agenda Badawcza dla Ochrony Radiologicznej w Polsce

P. Olko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk*

*ul. Radzikowskiego 152, 31-354 Kraków*

*\*e-mail: pawel.olko@ifj.edu.pl*

Strategiczna Agenda Badawcza (SAB) dla Ochrony Radiologicznej (OR) w Polsce powstała jako kompleksowy plan rozwoju badań podstawowych mający na celu wskazanie priorytetowych kierunków badań dla ochrony radiologicznej na najbliższą dekadę, w kontekście rosnącego znaczenia energetyki jądrowej, medycznych zastosowań promieniowania oraz zagrożeń cywilnych i militarnych.

Wytęczenie długoterminowych priorytetów prac badawczych pozwoli na koordynację wysiłków różnych ośrodków naukowych dla realizacji długofalowych celów polityki naukowej państwa polskiego, wzmocnienie roli Polski w międzynarodowych projektach badawczych oraz rozwój kompetencji w obliczu planowanego na 2035 rok uruchomienia pierwszej polskiej elektrowni jądrowej. Agenda jest próbą sformułowania kluczowych dla Polski priorytetów badawczych w odniesieniu do podobnych inicjatyw europejskich, takich jak opublikowana w 2025 biała księga projektu PIANOFORTE czy SAB Europejskiej Grupy Dozymetrii Promieniowania Jonizującego EURADOS.

SAB podzielona jest na cztery główne obszary badawcze. Obszar „Człowiek” dotyczy głównie skutków biologicznych działania promieniowania, radioterapii i ekspozycji na promieniowanie kosmiczne. Obszar „Bezpieczeństwo” obejmuje zagadnienia awarii i skażeń, radioprotektorów oraz psychologii i komunikacji zagrożeń. W obszarze „Energia” postulowane są badania, których efektem będzie zwiększone bezpieczeństwo pracy w energetyce jądrowej, lepsza dozymetria i gospodarka odpadami promieniotwórczymi. W obszarze „Środowisko” postulowane są kierunki badań, które pomogą w ulepszeniu zasad monitoringu, zrozumieniu migracji skażeń czy modelowaniu długoterminowego wpływu odpadów. W każdym z obszarów określone są perspektywiczne kierunki badawcze (perspektywy) i odpowiadające im wyzwania.

OR nie ma jeszcze trwałego miejsca w strukturze finansowania badań w Polsce. Postulujemy utworzenie interdyscyplinarnego panelu tematycznego w NCN, w ramach którego zostaną stworzone trwałe ramy instytucjonalne dla planowego i zrównoważonego rozwoju badań z zakresu OR, odpowiadające zarówno potrzebom nauki, jak i wymogom bezpieczeństwa publicznego.

## Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania dla wszystkich autorów Strategicznej Agendy Badawczej dla Ochrony Radiologicznej w Polsce, którymi są: Tomasz Bajda, Paweł Bilski, Michał Bonczyk, Beata Brzozowska, Kamil Brzóska, Maciej Budzanowski, Anna Cwanek, Agnieszka Dałhańczuk-Śródka, Marek Dohojda, Joanna Domienik - Andrzejewska, Joanna Dudała, Marcin Dybek, Krzysztof Fornalski, Michał Gryziński, Dominik Grządziel, Marek Janiak, Aleksandra Jung, Joanna Kidoń-Szołtysek, Aleksandra Klimas, Krzysztof Kozak, Paweł Krajewski, Marcin Kruszewski, Paweł Lipiński, Jakub Lukas, Mateusz Łukowski, Maciej Maciak, Ewa Mandowska, Arkadiusz Mandowski, Marek Maryański, Katarzyna Matusiak, Jadwiga Mazur, Bogusław Michalik, Brygida Mielewska, Jerzy Mielwski, Izabela Milcewicz- Mika, Paweł Możejko, Anna Mrozik, Paweł Olko, Jerzy Olszewski, Jakub Ośko, Marcin Pietrzak, Tadeusz Przylibski, Ewelina Pyszka, Anna Sas- Bieniarz, Małgorzata Sankowska, Maciej Sobczyk, Piotr Sobotka, Sylwester Sommer, Dagmara Strumińska-Parulska, Grzegorz Szaciłowski, Katarzyna Szarłowicz, Kamil Szewczak, Katarzyna Szufa, Dagmara Tchorz-Trzeciakiewicz, Piotr Tulik, Michael Waligórski, Katarzyna Wołoszczuk, Karolina Wójciuk

# Radiobiologiczne podstawy retrospektywnej dozymetrii biologicznej

K. Brzoska

*Zakład Naukowy – Centrum Radiobiologii i Dozymetrii Biologicznej,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa*

*e-mail: k.brzoska@ichtj.waw.pl*

**Słowa kluczowe:** radiobiologia, dozymetria biologiczna, promieniowanie jonizujące

Dozymetria biologiczna pozwala na oszacowanie dawki promieniowania jonizującego pochłoniętej przez organizm, oraz jej potencjalnych skutków zdrowotnych, na podstawie obserwowanych efektów biologicznych działania promieniowania (markerów biodozymetrycznych). Metoda ta jest kluczowa w sytuacjach awaryjnych, gdy istnieje podejrzenie znaczącej ekspozycji na promieniowanie, a dane z dozymetrii fizycznej są niedostępne lub niewiarygodne. Biodozymetria odgrywa również istotną rolę podczas zdarzeń obejmujących masowe narażenie na promieniowanie, umożliwiając szybkie zidentyfikowanie osób napromieniowanych dawkami zagrażającymi życiu i tym samym optymalne wykorzystanie dostępnych zasobów medycznych. Zastosowanie dozymetrii biologicznej pozwala również na potwierdzenie braku narażenia na dawki istotne z punktu widzenia zdrowia. Można to wykorzystać m.in. do budowania zaufania społecznego do energetyki jądrowej poprzez stałe monitorowanie stanu zdrowia mieszkańców okolic elektrowni jądrowych i potwierdzenie braku podwyższonej częstości markerów ekspozycji na promieniowanie.

Obecnie stosowane metody dozymetrii biologicznej są wynikiem badań nad oddziaływaniem promieniowania jonizującego na organizmy żywe, zapoczątkowanych wkrótce po odkryciu promieni X przez Wilhelma Conrada Röntgena. Badania podstawowe w tym zakresie wykazały, że obserwowane efekty biologiczne promieniowania są głównie efektem uszkodzeń materiału genetycznego komórek czyli DNA. Wieloletnie analizy typów tych uszkodzeń doprowadziły do identyfikacji aberracji chromosomowych charakterystycznych dla działania promieniowania. Współcześnie, „złotym standardem” dozymetrii biologicznej jest analiza częstości chromosomów dicentrycznych w limfocytach krwi obwodowej. Chromosomy dicentryczne to aberracje chromosomowe, w których jedna struktura chromosomowa zawiera dwa centromery zamiast jednego. Powstają one na skutek nieprawidłowego połączenia centromerowych fragmentów dwóch różnych chromosomów uszkodzonych przez promieniowanie. Mimo wysokiej czułości i specyficzności metoda ta jest czasochłonna i niskoprzepustowa, co ogranicza jej przydatność przy masowym narażeniu, gdy występuje konieczność przebadania wielu próbek w krótkim czasie. Ograniczenia te próbuje się pokonać dwutorowo: z jednej strony trwają prace nad wykorzystaniem sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do automatycznej analizy preparatów mikroskopowych w celu skrócenia czasu potrzebnego na otrzymanie wyników [1]. Z drugiej strony, prowadzone są dalsze badania podstawowe nad biologicznymi efektami działania promieniowania, które dzięki ogromnym postępom biologii molekularnej na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat umożliwiają poszukiwanie nowych markerów biodozymetrycznych na poziomie genomu, transkryptomu i proteomu [2]. Najbardziej obiecujące są badania nad zmianami ekspresji genów na poziomie mRNA (transkryptom) w odpowiedzi na promieniowanie. Jednym z najbardziej perspektywicznych markerów biodozymetrycznych tego typu jest gen FDXR, kodujący flawoproteinę będącą elementem mitochondrialnego łańcucha transportu elektronów. Wzrost ekspresji FDXR po napromienieniu jest najprawdopodobniej jednym z czynników inicjujących zależny od mitochondriów szlak apoptotycznej śmierci komórki. Badania wykazały, że w zakresie dawek 50 mGy - 4 Gy istnieje liniowa zależność pomiędzy poziomem transkryptu FDXR a logarytmem dawki pochłoniętej w komórkach krwi [3].

Mimo, iż dotychczasowe wyniki badań nad nowymi markerami biodozymetrycznymi, takimi jak FDXR, są obiecujące, konieczne są dalsze prace w celu określenia wpływu na ich ekspresję czynników takich jak: rodzaj promieniowania i moc dawki, czas jaki upłynął od ekspozycji, obecność chorób i przyjmowane leki, palenie tytoniu i inne czynniki związane ze stylem życia.



## Literatura

- [1] I. Atencia-Jiménez, A. S. Balajee, M. J. Ruiz-Gómez, F. Sendra-Portero, A. Montoro, M. A. Molina-Cabello. *Applied Sciences* 14(22), 10440 (2024). <https://doi.org/10.3390/app142210440>
- [2] K. Brzóska, M. Kruszewski, M. *Radiat Environ Biophys* 54(3), 353–363 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00411-015-0603-8>
- [3] K. Brzóska, M. Abend, G. O'Brien, E. Gregoire, M. Port, C. Badie. *Int J Radiat Biol.* 100(8), 1202–1212 (2024). <https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2373751>

# Praca z otwartymi źródłami promieniotwórczymi – możliwości i ograniczenia w pracy dydaktycznej i naukowej

J. Dudała

*Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej,*

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*

*e-mail: Joanna.Dudala@fis.agh.edu.pl*

**Słowa kluczowe:** otwarte źródła promieniotwórcze, ochrona radiologiczna

Praca z otwartymi źródłami promieniotwórczymi odgrywa istotną rolę zarówno w działalności dydaktycznej, jak i naukowej w zakresie fizyki jądrowej, ochrony radiologicznej oraz technik jądrowych stosowanych w przemyśle i medycynie. Wystąpienie ma na celu przedstawienie praktycznych aspektów wykorzystania takich źródeł w środowisku akademickim – od organizacji ćwiczeń laboratoryjnych po realizację projektów badawczych na przykładzie laboratorium radiochemicznego Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej. Omówione zostaną najczęściej stosowane izotopy, ich charakterystyka, wymagania techniczne i formalne związane z przechowywaniem, transportem oraz użytkowaniem. Szczególny nacisk zostanie położony na aspekty prawne i bezpieczeństwa wynikające z przepisów krajowych i międzynarodowych. Wskazane zostaną również istotne ograniczenia, takie jak procedury administracyjne, wymagania infrastrukturalne oraz rosnące koszty pozyskania i utylizacji materiałów promieniotwórczych. Wystąpienie zakończy dyskusja na temat możliwych kierunków rozwoju dydaktyki i badań z wykorzystaniem otwartych źródeł w kontekście zaostrzających się regulacji i rosnącego znaczenia alternatywnych metod dydaktycznych (symulacje, źródła zamknięte, modele cyfrowe).



Rysunek 1: Laboratorium radiochemiczne Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej – pokój „gorący”.

## Podziękowania

Praca została zrealizowana przy wsparciu finansowym Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach dotacji na badania naukowe.

# Energetyka jądrowa w Polsce, perspektywy rozwoju i obawy

A. Boryło

Wydział Chemii,

Uniwersytet Gdański, ul. Wita Stwosza 63, 80-306 Gdańsk

e-mail: alicja.borylo@ug.edu.pl

**Słowa kluczowe:** energetyka jądrowa, bezpieczeństwo energetyczne, korzyści, perspektywy

Budowa elektrowni jądrowej w Polsce to inwestycja strategiczna dla zrównoważonego rozwoju całego kraju, bowiem energetyka jądrowa stanowi stabilne źródło energii elektrycznej, natomiast możliwość zmagazynowania paliwa jądrowego na długi czas poprawi niezależność energetyczną kraju. Wśród głównych zalet rozwoju tego sektora należy wskazać przede wszystkim podniesienie poziomu bezpieczeństwa energetycznego kraju, bowiem zróżnicowanie źródeł energii elektrycznej, pozwoli zmniejszyć wpływ wahań na rynku węgla, gazu i ropy na ceny prądu. Nowoczesna elektrownia jądrowa może pracować 60, a w niektórych przypadkach nawet 80 lat, stąd koszt inwestycji rozkłada się na wiele lat pracy obiektu, co przy uwzględnieniu kosztów eksploatacji zapewni łatwe przewidywanie cen energii. Warto również wspomnieć, że elektrownia jądrowa nie emituje szkodliwych dla środowiska i zdrowia gazów, w szczególności CO<sub>2</sub>, związków siarki i azotu (SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub>) czy pyłów, natomiast powstające w elektrowni niewielkie ilości odpadów można bezpiecznie składować. Realizacja programu polskiej energetyki jądrowej wzmocni także polskie instytuty naukowe i przedsiębiorstwa, które prowadzą działalność związaną z tą dziedziną. Trwające obecnie badania środowiskowe w Lubiatowie-Kopalinie wskazują również, że społeczność lokalna popiera tę inwestycję (Rys. 1).



Rys. 1 Wizualizacja elektrowni jądrowej w Lubiatowie-Kopalinie

# Kto pierwszy, ten silniejszy? O radiacyjnych uszkodzeniach DNA i ich naprawie w komórkach

**B. Brzozowska**

*Zakład Fizyki Biomedycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski*

**Słowa kluczowe:** uszkodzenia DNA, promieniowanie jonizujące

Czy promieniowanie jonizujące różniące się gęstością jonizacji może prowadzić do wzmocnienia efektu jednoczesnego działania (synergia) i czy mechanizmem za to odpowiedzialnym jest indukcja kompleksowych uszkodzeń DNA? Czy ma znaczenie sekwencja napromieniania materiału komórkowego? Odpowiedź na te pytania zarówno przybliży nas do zrozumienia mechanizmu uszkodzenia i naprawy DNA, jak i ma duże znaczenie w radioterapii pacjentów onkologicznych, gdzie promieniowanie jonizujące o różnej gęstości jonizacji (np. radioterapia fotonowa i protonowa) wykorzystywane jest do niszczenia komórek nowotworowych. Charakterystyka oddziaływania promieniowania z materiałem komórkowym w nanoskali umożliwia zaproponowanie parametrów innych niż używane dotychczas w radiobiologii i radioterapii (dawka, liniowy przekaz energii) do zdefiniowania prawdopodobieństwa powstania kompleksowego uszkodzenia DNA.

# Dozymetria retrospektywna - wyzwania i perspektywy w ujęciu praktycznym i naukowym

A. Jung\*

<sup>1</sup>*Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej,*

*Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*

\**e-mail: jung@agh.edu.pl*

**Słowa kluczowe:** termoluminescencja, optycznie stymulowana luminescencja, elektronowy rezonans paramagnetyczny, dozymetria retrospektywna

Dozymetria retrospektywna odgrywa istotną rolę w szacowaniu dawek promieniowania jonizującego w sytuacjach awaryjnych, przypadkowej ekspozycji lub w przypadku braku danych z dozymetrów indywidualnych. W ujęciu praktycznym umożliwia ona ocenę dawek pochłoniętych przez osoby narażone na promieniowanie, korzystając z materiałów codziennego użytku, które mogły znajdować się w ich bezpośrednim otoczeniu. W ujęciu naukowym stanowi dynamicznie rozwijającą się dziedzinę, wymagającą ciągłego doskonalenia metod pomiarowych, analitycznych i interpretacyjnych. Stanowi dodatkowo inspirację w poszukiwaniu nowych materiałów, które mogłyby znaleźć zastosowanie w dozymetrii rutynowej.

W prowadzonych badaniach najczęściej znajduje zastosowanie wykorzystanie zjawiska termoluminescencji (TL), optycznie stymulowanej luminescencji (OSL) oraz elektronowy rezonans paramagnetyczny (EPR). Najczęściej analizowane materiały to elementy telefonów komórkowych, w szczególności szkła, farmaceutyki, kosmetyki, kamienie szlachetne, banknoty, sól kamienna czy materiały stomatologiczne. Te niepozorne obiekty, pozornie niepowiązane z dozymetrią wykazują właściwości umożliwiające ich wykorzystanie jako nieformalnych detektorów promieniowania i stanowią wartościowe dozymetry pasywne, przechowujące w swojej strukturze informację o ekspozycji radiacyjnej. Badanie tych materiałów i przygotowanie protokołów wymaga jednak sprostania wyzwaniom związanym z kalibracją tych materiałów, stabilnością sygnału, powtarzalnością odpowiedzi, oceną czułości i liniowości odpowiedzi luminescencyjnej. Metody TL i OSL charakteryzują się wysoką czułością detekcji i relatywnie dobrą stabilnością sygnału w czasie. Istotnym wyzwaniem pozostaje jednak opracowanie zoptymalizowanych protokołów przygotowania próbek, ich odczytu oraz rekonstrukcji dawki.

W kontekście praktycznym, dozymetria retrospektywna może być nieoceniona w analizie sytuacji awaryjnych, takich jak wypadki radiacyjne czy nieautoryzowane narażenie ludności. Wymaga to jednak dopracowanych protokołów pomiarowych, standaryzacji warunków odczytu oraz skutecznych metod identyfikacji i weryfikacji materiałów. Czas pomiaru musi być jak najkrótszy, przy zapewnieniu odpowiedniej precyzji odczytu.

W prowadzonych badaniach konieczne jest połączenie perspektywy aplikacyjnej na wypadek sytuacji awaryjnej z rzetelnymi wynikami badań naukowych prowadzonych w celu znalezienia nowych, skutecznych i dostępnych materiałów.

Aktualnie prowadzone badania koncentrują się na charakterystyce dozymetrycznej nowych materiałów oraz skróceniu protokołów odczytu dla znanych materiałów, takich jak szkła telefonów komórkowych.

## Literatura

- [1] J. Łepkowska, A. Jung, Measurement 204, 112063 (2022)
- [2] J. Łepkowska, A. Jung, Radiat Meas. 176, 107203 (2024)

# Pomiary skażeń radioaktywnych w Arktyce

E. Łokas<sup>1\*</sup>, A. Cwanek<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Zakład Spektrometrii Mas,*

*Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk, ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków*

\**e-mail: edyta.lokas@ifj.edu.pl*

**Słowa kluczowe:** skażenia radioaktywne, pluton, ameryk, lodowce, spektrometria mas, spektrometria alfa

Izotopy promieniotwórcze są obecne w środowisku zarówno wskutek naturalnych procesów, jak i działalności człowieka. Głównymi źródłami sztucznych izotopów promieniotwórczych w Arktyce pozostają opady z atmosferycznych testów broni jądrowej w latach 50. i 60. XX wieku oraz daleki transport radionuklidów emitowanych przez europejskie zakłady przerobu paliwa jądrowego. Arktykę skażyły również w niewielkim stopniu radionuklidy (<sup>137</sup>Cs) pochodzące z katastrofy jądrowej w Czarnobylu w 1986 r. oraz z wypadku w Fukushima w 2011 r. Istnieją jednak inne potencjalne źródła skażeń promieniotwórczych w Arktyce, takie jak zatopione okręty podwodne z napędem jądrowym, wykorzystanie nowych technologii jądrowych czy zrzuty odpadów radioaktywnych do morza.

Wiele krajów świata zainicjowało ambitne programy energetyki jądrowej lub zadeklarowało zamiar wytwarzania energii elektrycznej przy użyciu reaktorów jądrowych w niedalekiej przyszłości. Ocena wpływu tych programów na środowisko wymaga rutynowego monitorowania opadu radioaktywnego. Poza tym szczególną uwagę należy zwrócić na zastosowania materiałów jądrowych w misjach kosmicznych. Radioizotopowe generatory termoelektryczne (RTG) są kluczową technologią umożliwiającą eksplorację kosmosu. Tylko USA, Rosja i Chiny wykazały zdolność do produkcji RTG do użytku w kosmosie, a Europejska Agencja Kosmiczna finansuje wysiłki mające na celu opracowanie małego RTG na bazie ameryku-241.

Dużą rolę odgrywa również sposób, w jaki radionuklidy zachowują się w środowisku Arktyki, zmieniając się w wyniku zmiany klimatu, podczas gdy potencjalne nowe źródła radionuklidów mogą zagrozić wrażliwemu środowisku regionu, ludziom tam mieszkającym i ich tradycyjnym źródłom utrzymania.

Wpływ na rozprzestrzenianie się i akumulację skażeń promieniotwórczych w środowisku Arktyki mają zmiany klimatu i innych elementów globalnego środowiska. Zmniejszające się lodowce stają się coraz bardziej znaczącym wtórnym źródłem zanieczyszczeń promieniotwórczych uwalnianych do środowiska od połowy XX wieku i akumulowanych w lodzie i na powierzchni lodowców. Radionuklidy należą do zanieczyszczeń przenoszonych drogą atmosferyczną, które gromadzą się w materiale kriokonitu – ciemnej mieszance materiału mineralnego i organicznego osadzonego na śniegu i lodzie – na powierzchni lodowców i mogą być ponownie mobilizowane poprzez topnienie lodu. Poziomy radioaktywności znalezione w kriokonicie w Arktyce są wysokie i często są o rzędy wielkości wyższe niż w innych środowiskach lądowych.

Z uwagi na szybko zmieniające się warunki klimatyczne w Arktyce konieczne jest zarówno monitorowanie zanieczyszczeń promieniotwórczych w powietrzu atmosferycznym, jak i systematyczne rozpoznawanie poziomu zanieczyszczeń na lodowcach i w ekosystemach arktycznych. Ponadto rozwój nowych metod badawczych służących do identyfikacji dominujących źródeł promieniotwórczości na podstawie stosunków izotopowych może stanowić cenną wiedzę dotyczącą badań promieniotwórczości w Arktyce. Szczegółowa analiza izotopów <sup>137</sup>Cs, uranu, plutonu i <sup>241</sup>Am w różnych matrycach (np. osadach na powierzchni lodowców i filtrach powietrza), przyczynia się do identyfikacji źródła i odróżnienia radioizotopów pochodzących z redepozycji od świeżo uwolnionych.

W ciągu 20 lat pomiarów prowadzonych w Arktyce w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie zaobserwowaliśmy pewne anomalie izotopowe (<sup>238</sup>Pu/<sup>239+240</sup>Pu, <sup>241</sup>Am/<sup>239+240</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu), które mogą mieć związek zarówno z istniejącymi jak również ze współczesnymi niezidentyfikowanymi zdarzeniami. Podwyższone stosunki izotopowe <sup>238</sup>Pu/<sup>239+240</sup>Pu (0,118) i <sup>241</sup>Am/<sup>239+240</sup>Pu (1,05) zaobserwowano w lodowcach Spitsbergenu oraz w przygruntowej warstwie powietrza przy Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie (8,3 i 460, odpowiednio). Natomiast wyniki badań prowadzone na Alasce sugerują wpływ opadu pochodzącego z testów w Nevadzie (0,09), charakteryzującego się średnim stosunkiem <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu wynoszącym 0,03.

Biorąc pod uwagę wyniki badań prowadzone w Arktyce, rutynowy monitoring sztucznych radionuklidów wydaje się być konieczny. Wieloletnie badania prowadzone w lodowcach oraz w aerozolach atmosferycznych podkreślają ogromne znaczenie uwzględnienia alfa emitatorów takich jak Pu w rutynowych pomiarach w ramach programów kontroli sytuacji radiacyjnej.

# Wybrane problemy oceny oddziaływania na środowisko obiektów jądrowych w warunkach normalnej eksploatacji

P. Krajewski<sup>1\*</sup>, G. Krajewska<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, ul. Konwaliowa 7, 03-194, Warszawa

\*e-mail: krajewski@clor.waw.pl

**Słowa kluczowe:** obiekt jądrowy, izotopy promieniotwórcze, środowisko, ocena narażenia

Termin oddziaływanie obiektów jądrowych na środowisko może obejmować szeroki zakres przedsięwzięć przygotowawczych dla lokalizacji planowanego obiektu jądrowego, w trakcie których, człowiek dokonuje znaczących ingerencji w środowisko np. począwszy od wycinki lasu w przyszłej lokalizacji obiektu jądrowego, rozbudowy infrastruktury sieci energetycznej niezbędnej dla odbioru energii elektrycznej z EJ, a kończąc na drażnieniu skał dla głębokiego składowiska odpadów promieniotwórczych oraz wiele innych.

Konieczne badania i analizy mają uzasadnić przydatność wybranej lokalizacji z punktu widzenia bezawaryjnej eksploatacji obiektu jądrowego, jak również wykazać, że „potencjalne zmiany” jakie nastąpią w środowisku w trakcie budowy a później eksploatacji obiektu jądrowego nie będą skutkować dewastacją tego środowiska, a korzyści dla społeczności wynikające z kontynuacji działalności obiektu przewyższają szkody (łącznie ze szkodą radiacyjną) wynikające z tej działalności. Z punktu widzenia ochrony radiologicznej, pod terminem „oddziaływanie obiektów jądrowych na środowisko” rozumie się oddziaływanie promieniowania jonizującego emitowanego przez uwalniane izotopy promieniotwórcze z materią żywą oraz skutkami tego oddziaływania.

Warto zaznaczyć, że pojęcie „środowiska” w rozumieniu prowadzonych ocen radiologicznych, obejmuje zarówno środowisko naturalne, jak też środowisko będące częściowo wytworem działalności człowieka. Elementami, tego pojęcia są: człowiek, fauna, flora, gleba, woda, powietrze, zasoby naturalne, a także zasoby wodne (w szczególności zwierzęta i rośliny hodowlane oraz odpady). Dawne stanowisko (zwane paradygmatem) Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej mówiące, że „ochrona radiologiczna człowieka, zapewnia z dużym prawdopodobieństwem ochronę innych żywych gatunków” [1], ulegało znacznej rewizji na rzecz stanowiska, że ochrona radiologiczna środowiska wymaga „oceny różnych sytuacji (scenariuszy) narażenia fauny i flory niezależnie od obecności człowieka” oraz „przeprowadzenia bezpośredniego dowodu, że środowisko w rozumieniu fauny i flory jest chronione” [2].

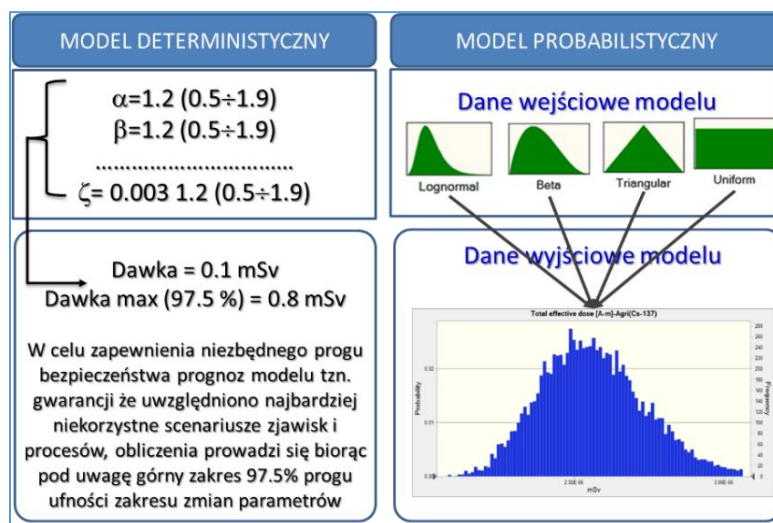
Kolejną istotną zmianę w metodyce oceny oddziaływania obiektu jądrowego na środowisko, wprowadziła publikacja [3], rekomendując ściśle liczbową ocenę niepewności prognozy dawki, co w praktyce oznaczało przyjęcie dla parametrów wejściowych modelu określonego rozkładu prawdopodobieństwa (tzw. *probability density function*) i przeprowadzenie obliczeń niepewności prognozy metodą Monte Carlo. Zmienił się zatem model obliczeniowy oraz charakter prognozy dawki, której już nie określa jedna liczba (model deterministyczny), tylko wyznacza ją pewien rozkład prawdopodobieństwa dawek (model probabilistyczny). Rys.1 ilustruje dwie różne metody prowadzenia obliczeń modelowych: deterministyczną oraz probabilistyczną.

Metodyka oceny przydatności obszaru przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego oraz oceny oddziaływania na środowisko obiektu jądrowego jest podmiotem polskich regulacji prawnych opartych na rekomendacjach międzynarodowych [4], [5], [6], [7], [8]. Zgodnie z tzw. Rozporządzeniem Lokalizacyjnym [8], szczegółowy zakres przeprowadzania oceny terenu przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego obejmuje: „analizę tempa, ilości i dróg rozprzestrzeniania się substancji promieniotwórczych na zewnątrz obiektu jądrowego”, w tym ocenę przechodzenia uwalnianych radionuklidów do atmosfery, wód powierzchniowych oraz wód podziemnych do organizmu człowieka i jest jednym z elementów jakie powinien obejmować tzw. Raport Lokalizacyjny, który inwestor obiektu jądrowego przedkłada Prezesowi Państwowej Agencji Atomistyki w celu uzyskania pozytywnej opinii w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej tego obiektu.

Ponadto Raport Lokalizacyjny powinien zawierać „opisy modeli rozprzestrzeniania się uwolnień izotopów promieniotwórczych do atmosfery, w wodach powierzchniowych oraz do wód podziemnych dla przyjętych projektowych uwolnień, z uwzględnieniem łańcuchów pokarmowych i oszacowaniem dawek skutecznych i równoważnych otrzymanych przez ludność w wyniku narażenia na promieniowanie jonizujące, wraz ze wskazaniem wykorzystanych parametrów danych, metodyki obliczeniowej oraz sposobów weryfikacji modelu”.

Odnośnie metodyki oceny dawek oraz metodyki pozyskiwania danych niezbędnych dla obliczeń za pomocą modeli komputerowych, to poza stwierdzeniem w Rozporządzeniu Lokalizacyjnym „w/w czynniki ocenia się z

uwzględnieniem zachowawczego podejścia”, brak jest odpowiednich przewodników krajowych. Jako pomoc mają służyć rekomendacje oraz przewodniki i dokumenty techniczne Międzynarodowej Agencji Atomistyki (MAEA) [3], [9], [10]. Dokumenty techniczne MAEA [10] wyszczególniają pięć standardowych scenariuszy uwolnień izotopów promieniotwórczych np: do atmosfery, do rzeki, do jeziora, do ujęcia rzecznoego oraz do morza, a każdy scenariusz uwolnień charakteryzuje się odmiennym modelem zjawisk fizykochemicznych zachodzących w środowisku, innym rozkładem stężeń izotopów promieniotwórczych oraz odrębną charakterystyką dróg narażenia i wielkością ekspozycji. Jednak w większości przypadków obiekt jądrowy, w zależności założeń konstrukcyjnych oraz swojej lokalizacji, jednocześnie uwalnia pierwiastki promieniotwórcze do różnych ekosystemów, np. do atmosfery oraz rzeki, do atmosfery oraz jeziora, do atmosfery oraz morza. Każdy scenariusz wymaga oddzielnej oceny dróg narażenia oraz dawek, a następnie łącznej oceny dawki całkowitej.



Rysunek 1. Diagram obrazujący dwa różne podejścia przy prowadzeniu obliczeń modelowych: deterministyczne i probabilistyczne.

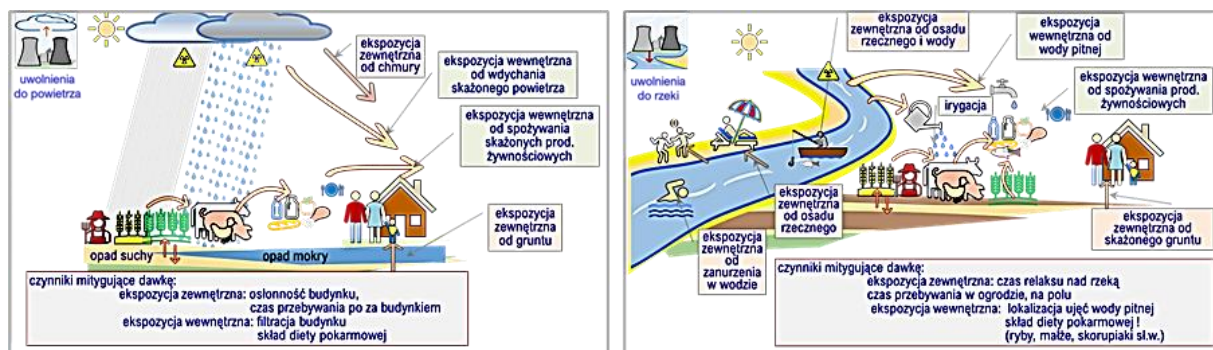
Poza publikowaniem standardów, wytycznych, przewodników oraz dokumentów technicznych, MAEA od 30 lat prowadzi programy mające na celu doskonalenie metod i modeli dla oceny ryzyka radiologicznego. Opis poszczególnych programów oraz szczegółowe raporty można znaleźć na stronie internetowej Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej MAEA: <http://www.ns.iaea.org/projects/>. Wspomniane tutaj programy MAEA nie mają charakteru konkursowych i sponsorowanych programów badawczych jak np. programy UE w ramach EURATOM lub HORYZONT 2020 czy granty krajowe NCBiR, stanowią raczej platformę wymiany doświadczeń między wysokiej klasy specjalistami pod patronatem MAEA, a członkostwo w tych programach było zawsze finansowane z funduszy krajów uczestniczących. Nie rzutuje to w żadnym wypadku na popularność tych programów, w których zwykle brało udział około 200 naukowców z ponad 40 liczących się gospodarczo krajów ze wszystkich kontynentów [11], [12], [13]. Celem w/w programów jest: zbieranie, analizowanie i opracowywanie danych pomiarowych do standardowych scenariuszy, testowanie, porównywanie i tworzenie modeli prognozy dawek, prowadzenie ocen narażenia dla planowanych, wyjątkowych i istniejących warunków ekspozycji (dla ludzi -różnych grup populacji oraz dla flory i fauny), wsparcie dla spełnienia wymagań nowych przepisów (IAEA Safety Standards), forum dla wymiany doświadczeń.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej uczestniczyło w tych programach od początku ich powstania (1988 r.), głównie przy tworzeniu i walidacji modeli obliczeniowych służących do oceny sytuacji radiacyjnej. Między innymi był rozwijany i testowany na bazie „ślepych scenariuszy” model komputerowy CLRP (Concentration Levels Rapid Predictions) służący do przewidywania skażeń w środowisku w skutek awaryjnego lub rutynowego uwolnienia substancji radioaktywnych oraz prognozowania dawek promieniowania dla populacji [14]. Rys. 2 przedstawia drogi narażenia oraz czynniki zmniejszające dawkę, jakie należy uwzględnić przy ocenie narażenia populacji od uwolnieniach izotopów promieniotwórczych do atmosfery oraz do rzeki.

W okresie 2012-2021, przeprowadzono szereg ocen dla rutynowych uwolnień z różnego typu obiektów jądrowych m.in. uwolnienia do atmosfery i rzeki: EJ w Chinon (Francja, EDF&IRSN); Płytkie Składowisko Odpadów Radioaktywnych w L'Aube (Francja, ANDRA); Laboratorium Badawcze w Cadarache (Francja, CEA);



EJ (PHWR) w Atucha (Argentyna, ARN). Obliczenia prowadzono z użyciem następujących kodów komputerowych: francuski IRSN SYMBIOSE, słowacki ESTE AI f-my ABMerit, hiszpański CROM rozwijany w CIEMAT, model polski CLRP, angielski PC-CREAM rozwijany w PHE (Public Health England) oraz argentyński PC CREAM 08 używany przez ARN (Autoridad Regulation Nuclear) [15]. Wnioski z przeprowadzonych ocen są jednoznaczne: całkowite dawki dla referencyjnego człowieka mieściły się w granicach od 0.01  $\mu\text{Sv}$  do 10  $\mu\text{Sv}$ , nie przekraczając jednej dziesiątej limitu 100  $\mu\text{Sv}$ . Największy udział w dawce miały radionuklidy C-14 (~50 %), H-3 (~40%). Moc całkowitej dawki dla referencyjnych organizmów mieściła się w zakresie od  $10^{-6}$   $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$  do  $10^{-4}$   $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ , nie przekraczając  $10^{-5}$  tzw. poziomu referencyjnego przyjętego w krajach europejskich, który wynosi 40  $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$  [16].



Rysunek 2: Drogi narażenia oraz czynniki zmniejszające dawkę uwzględniane przy ocenie narażenia populacji od uwolnienia izotopów promieniotwórczych do atmosfery oraz do rzeki.

## Literatura

- [1] ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. , ELSEVIER, 2007. ISBN 978-0-7020-3048-2.
- [2] ICRP Publication 124. Protection of the environment under different exposure situations. Ann. ICRP : 43(1), 2014. ISBN 9781446296141.
- [3] IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. GSR Part 3. RADIATION PROTECTION AND SAFETY OF RADIATION SOURCES: INTERNATIONAL BASIC SAFETY STANDARDS. VIENNA : IAEA, 2014. ISBN 978-92-0-135310-8.
- [4] Ustawa z dnia 9 marca 2023 r. o zmianie ustawy o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących oraz niektórych innych ustaw. : (Dz. U. z 2023 poz. 595), 2024.
- [5] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. -Prawo Atomowe. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 16 września 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo atomowe. s.l. : (Dz.U. 2021 poz. 1941), 2021.
- [6] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 lutego 2013 r. w sprawie wymagań dotyczących rozruchu i eksploatacji obiektów jądrowych. : (Dz. U. z 2013 r. poz. 281), 2013.
- [7] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 sierpnia 2022 r. w sprawie zakresu programu monitoringu radiacyjnego środowiska opracowywanego i wdrażanego przez jednostki organizacyjne zakwalifikowane do I lub II kategorii zagrożeń.: (Dz. U. z 2022 r. poz. 2058), 2022.
- [8] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 sierpnia 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu przeprowadzania oceny terenu przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego, przypadków wykluczających możliwość uznania terenu za spełniający wymogi lokalizacji obiektu jądrowego oraz w sprawie wymagań dotyczących raport. s.l. : (Dz. U. z 2012 r poz.1025), 2012.
- [9] IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NG-T-3.11 (Rev. 1). ENVIRONMENTAL PROTECTION IN NEW NUCLEAR POWER PROGRAMMES. VIENNA : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2024. ISBN 978-92-0-155223-5.

- [10] SAFETY REPORTS SERIES No. 19. GENERIC MODELS FOR USE IN ASSESSING THE IMPACT OF DISCHARGES OF RADIOACTIVE SUBSTANCES TO THE ENVIRONMENT. VIENNA : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2001.
- [11] IAEA-TECDOC-1678. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS). Vienna : IAEA, 2012. ISBN 978-92-0-129810-2.
- [12] IAEA-TECDOC-1808. Performance of Models in Radiological Impact Assessment for Normal Operation. Vienna : IAEA, 2017. ISBN 978-92-0-112616-0.
- [13]. IAEA. MODARIA, Modelling and Data for Radiological Impact Assessments. <https://www-ns.iaea.org/projects/modaria/default.asp?s=8&l=129>. [Online]
- [14] P. Krajewski, G. Krajewska, Walidacja opracowanego w CLOR kodu komputerowego CLRP w ramach programów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, Warszawa : CLOR, 2022, Vol. 163. ISBN 978-83-947765-6-5.
- [15] P. Krajewski, G. Krajewska, Rozwój metod i modeli do oceny ryzyka radioekologicznego w ramach międzynarodowego programu MAEA Modaria (2016-2019). Warszawa : CLOR, 2020, Vol. 160/161. ISBN 978-83-947765-4-1.
- [16] ERICA Assessment Tool . <https://erica-tool.com/>. [Online]

# Radon a elektrownie jądrowe

J. Olszewski\*, J. Domienik-Andrzejewska

*Instytut Medycyny Pracy im. Prof. Dr n med. Jerzego Nofera, ul. Św. Teresy od Dzieciątka Jezus 8, 91-348 Łódź*

\*e-mail: Jerzy.Olszewski@imp.lodz.pl

**Słowa kluczowe:** radon, stężenie radonu, dawka efektywna, ryzyko zawodowe

## Radon

Spośród wszystkich naturalnych źródeł promieniowania występujących w strefie przebywania człowieka, radon stwarza dla niego największe zagrożenie radiologiczne. Jak się obecnie ocenia, ponad połowa obciążenia radiacyjnego ludności Polski od promieniowania naturalnego wynika z wdychania radonu.

Radon jest klasyfikowany przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (z ang. IARC) jako czynnik rakotwórczy dla ludzi (kancerogen klasy I).

Zagrożenie radiologiczne stwarza nie sam radon, ale jego pochodne  $^{218}\text{Po}$  i  $^{214}\text{Po}$ , które przyłączone do cząstek aerozoli osadzają się razem z nimi głównie na ściankach oskrzeli. Emitują one cząstki alfa o energiach odpowiednio 6,0 MeV i 7,69 MeV, które są dostatecznie duże, aby napromienić warstwy komórek podstawnych oskrzeli i płuc. Ostatnie analizy i metaanalizy dostępnych danych epidemiologicznych (ICRP, Publikacja 115) wykazały, że nominalny współczynnik ryzyka dla indukcji nowotworu płuc jest około dwukrotnie wyższy niż zakładano do tej pory, a ekspozycja na wartości stężeń radonu występujące w powietrzu w zamkniętych pomieszczeniach może prowadzić do rozwoju raka płuc. Fakt ten sprawia, że problem narażenia na radon jest teraz jeszcze istotniejszy i bardziej pilny z punktu widzenia zdrowia publicznego i konieczności opracowania oraz wdrożenia odpowiedniej strategii działania. „Krajowy plan działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy” opublikowany przez Ministra Zdrowia nie uwzględnia wszystkich niezbędnych zmian legislacyjnych kluczowych dla właściwej, zgodnej z najnowszymi wynikami badań, oceny narażenia, w tym, konieczności uaktualnienia odpowiednich współczynników przeliczeniowych niezbędnych do wyliczenia dawki efektywnej wynikającej z narażenia na radon w miejscu pracy.

## Ryzyko zawodowe

Ministerstwo Pracy definiuje **ryzyko zawodowe**, jako prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń (zagrożeń) związanych z wykonywaną pracą i powodujących straty, oraz ich skutków dla zdrowia lub życia pracowników w postaci chorób zawodowych i wypadków przy pracy.

Z tego wynika, że **ryzyko zawodowe** to nic innego jak niebezpieczeństwa, na które narażony jest pracownik w czasie wykonywania swoich obowiązków.

Według przepisów Kodeksu pracy pracodawca jest zobowiązany do oceny i dokumentowania **ryzyka zawodowego** związanego z wykonywaniem przez pracowników swoich obowiązków, a także do stosowania niezbędnych środków profilaktycznych w celu zniwelowania zagrożeń.

Przeprowadzając ocenę **ryzyka zawodowego** należy wziąć pod uwagę wszystkie czynniki środowiska występujące podczas wykonywania pracy na danym stanowisku. Bowiem głównym celem oceny ryzyka zawodowego jest poprawa warunków pracy oraz ochrona życia i zdrowia zatrudnionych osób. A więc i radon.

## Prawo

W ślad za **Dyrektywą Rady 2013/59/EURATOM** uchwalone Prawo atomowe zawiera kilka bardzo istotnych zapisów dotyczących radonu. Wybrane zapisy to:

Art. 7. 1. Za przestrzeganie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej odpowiada kierownik jednostki organizacyjnej.

1b. W przypadku osób z ogółu ludności dawki graniczne obejmują sumę rocznego narażenia osób z ogółu ludności ze wszystkich działalności związanych z narażeniem.

Art. 23b. Ustala się poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w:

- 1) miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń oraz
  - 2) pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi
- w wysokości 300 Bq/m<sup>3</sup> (bekereli na metr sześcienny).

### **I elektrownie jądrowe**

1. Należy zbadać potencjał radonowy przed wybudowaniem elektrowni
2. Należy oszacować dawki efektywne od radonu

Przykładowo: dla stężenia  $300 \text{ Bq/m}^3$  roczna praca (tj. 1992 godziny pracy w 2025 roku) to dawka 1,86 mSv.

### **Dawki wg rekomendacji Międzynarodowej Komisji Ochrony adologicznej (z ang. ICRP) i konsekwencje**

Analiza danych z pomiarów komercyjnych (6326 punktów pomiarowych) wskazuje, że w pomieszczeniach, w których stężenia radonu przekraczają poziom odniesienia  $300 \text{ Bq/m}^3$  (tj. w 737 pomieszczeniach), oszacowane (na podstawie obowiązującego w prawie współczynnika przeliczeniowego oraz założonego współczynnika równowagi  $F=0,4$ ) dawki efektywne dla pracowników wykonujących tam swoje obowiązki (przy założeniu 8 godzinnego dnia pracy), mieszczą się w szerokim przedziale od 2 mSv do nawet 47 mSv; średnia dawka wynosi 4,7 mSv przy czym w 2% pomieszczeń obserwowane byłyby przypadki przekroczeń limitu 20 mSv. Uwzględniając dodatkowo, że nowy współczynnik przeliczeniowy, zgodny z aktualnymi rekomendacjami ICRP (ICRP, Publikacja 137), jest ponad 2-krotnie wyższy od obowiązującego, powyższy fakt wskazuje jak bardzo istotna jest optymalizacja narażenia i kampanie informujące pracodawców oraz osoby z ogółu ludności o możliwych metodach obniżania stężenia radonu. Symulacja liczby miejsc pracy (pomieszczeń), w których pracownicy musieliby być zakwalifikowani do odpowiednich kategorii narażenia przy aktualnych stężeniach (tj. w przypadku, gdyby nie udało się ich obniżyć) pokazuje, że 10% miejsc pracy (tj. 602) należałoby zaliczyć do terenów nadzorowanych a 2% do terenów kontrolowanych (tj. 135 miejsc pracy) a po ewentualnym wprowadzeniu do przepisów prawa nowego współczynnika przeliczeniowego odpowiednio 5% (tj. 301 miejsc pracy) i 7% (tj. 436).

Należy jednak pamiętać, że w powyższej analizie jest wiele niepewności związanych z samą oceną wartości średniorocznego stężenia radonu oraz odpowiednich współczynników. Ich potwierdzenie powinno stanowić temat dalszych badań.

# Dozymetria w skali nano, czyli jak policzyć uszkodzenia DNA

M. Pietrzak

*Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku*

**Słowa kluczowe:** dozymetria, promieniowanie jonizujące, uszkodzenia DNA

Dozymetria w skali nano, czyli nanodozymetria, zajmuje się badaniem nie tyle dawki co jakości promieniowania. Wielkości którymi operuje opierają się na fizycznych cechach struktury toru cząstek jonizującej. Ponieważ zarówno średnie odległości między jonizacjami, jak i średnica DNA są rzędu pojedynczych nanometrów, zakłada się, że różnice w przestrzennej strukturze jonizacji w tej właśnie skali są źródłem różnic w skuteczności biologicznej różnych rodzajów promieniowania. Na tym poziomie znaczenie mają już poszczególne akty jonizacji, które można korelować z liczbą uszkodzeń DNA. Jak się jednak łatwo domyślić, ujawnienie liczby jonizacji w nanometrowej wielkości targacie nie jest łatwe. Stąd też mnogość konkurencyjnych rozwiązań zarówno od strony eksperymentalnej, jak i symulacji Monte Carlo. W prezentacji przedstawię ostatnie osiągnięcia w tej dziedzinie, ze szczególnym uwzględnieniem wyników grupy NCBJ-FUW, oraz perspektywy dalszego rozwoju stosowanych przez nas technik pomiarowych i numerycznych.

# Wpływ współwystępowania szkodliwych czynników fizycznych i chemicznych na zagrożenie radiacyjne w środowisku

Bogusław Michalik

*Śląskie Centrum Radiometrii Środowiskowej, Główny Instytut Górnictwa - Państwowy Instytut Badawczy*

*Plac Gwarków 1 40-166 Katowice*

e-mail: [bmichalik@giq.eu](mailto:bmichalik@giq.eu)

**Słowa kluczowe:** zagrożenie, promieniowanie jonizujące, substancje szkodliwe, współwystępowanie

Pojawienie się substancji promieniotwórczych w środowisku, niezależnie od ich pochodzenia i skali zjawiska, zawsze jest postrzegane jako problem wymagający reakcji w zakresie ochrony radiologicznej. Ekspozycja na promieniowanie jonizujące jest uważana za czynnik krytyczny, a pozostałe okoliczności zazwyczaj nie odgrywają większej roli. W znakomitej większości przypadków, szczególnie w sytuacjach niekontrolowanego uwolnienia sztucznych nuklidów promieniotwórczych do środowiska w wyniku awarii lub wypadków radiacyjnych, takie podejście jest uzasadnione. Jednakże, rozpatrując taką sytuację, należy podkreślić, że rzadko mamy do czynienia z zanieczyszczeniem środowiska naturalnego w jego niezmienionej postaci. Co więcej, niezależnie od zaleceń ICRP [1] rekomendujących uwzględnienie środowiska (na poziomie poszczególnych organizmów lub nawet ekosystemów [2,3]) jako odrębnego obiektu podlegającego ochronie przed promieniowaniem, niezależnie od jego interakcji z człowiekiem, to co nas najbardziej interesuje w takich okolicznościach, to zanieczyszczenie środowiska, w którym przebywa człowiek. Współcześnie są to tereny zmienione w celu ich dostosowania do potrzeb człowieka, tereny użytkowane rolniczo, obszary zurbanizowane oraz tereny wykorzystywane w działalności przemysłowej (teraz i w przeszłości). O ile w dwóch pierwszych przypadkach ograniczenie się tylko do nuklidów promieniotwórczych może być w pewnym sensie uzasadnione, to dla terenów przemysłowych, a w szczególności po-przemysłowych, rozważania dotyczące tylko zanieczyszczeń promieniotwórczych mogą prowadzić do błędnej interpretacji istniejącej sytuacji, wynikającej zarówno z przecenienia istniejącego zagrożenia, jak i jego niedocenienia.

Dla terenów poddanych silnej presji antropologicznej kryteria zastosowane do oceny zagrożenia radiacyjnego powinny uwzględniać charakterystykę zagrożonego obszaru, która dla terenów przemysłowych jest znacząco różna od środowiska naturalnego. Poza zmianami fizycznymi, wynikającymi z dostosowania danego obszaru do określonej działalności oraz braku naturalnego ekosystemu, dla właściwej oceny istniejącej sytuacji istotna jest obecność innych substancji szkodliwych.

Występowanie innych niż promieniotwórcze substancji i czynników szkodliwych w pierwszej kolejności postrzegane jest z perspektywy ich toksyczności chemicznej, której spodziewane skutki mają analogiczny charakter, przynajmniej w pewnym zakresie, jak skutki wywołane promieniowaniem jonizującym. W takiej sytuacji uwzględnienie potencjalnych interakcji sprowadza się do obserwacji określonych skutków na poziomie indywidualnych organizmów biologicznych. Istotny jest fakt, że toksyczność chemiczna danej substancji wynika z jej reakcji chemicznych z innymi substancjami, co powoduje zakłócenie procesów metabolicznych w układzie biologicznym a skutki wywołane promieniowaniem ograniczają się do bezpośredniego lub pośredniego uszkodzenia DNA. Ze względu na różne mechanizmy powstawania uszkodzeń, można się spodziewać nie tylko sumowania efektów wywołanych przez poszczególne czynniki, ale również zjawiska synergii. Klasycznym przykładem synergii skutków wywołanych przez różne czynniki jest statystycznie wykazany istotny wzrost zachorowania na raka płuc u osób narażonych na radon i palących papierosy, w porównaniu do osób niepalących [4].

Oprócz bezpośredniej interakcji promieniowania jonizującego i innych substancji szkodliwych

możliwych do zaobserwowania na poziomie pojedynczego organizmu, występowanie różnych czynników zagrożenia może powodować zmiany wpływające na powstające drogi narażenia. W odróżnieniu od szkodliwych czynników chemicznych, powstanie zagrożenia powodowanego przez nuklidy promieniotwórcze nie wymaga bezpośredniego kontaktu z narażonym obiektem i nie zależy od postaci chemicznej danego nuklidu. Powoduje to, że drogi powstawania narażenia na promieniowanie i substancje chemiczne mogą się różnić i w sposób odmienny reagować na pojawienie się nowych czynników w środowisku (np. na zmiany pH). Również konkretne cechy środowiska mogą zmieniać drogi powstawania narażenia, np. wpływając na postać chemiczną danej substancji szkodliwej. W takich okolicznościach interakcja różnych zanieczyszczeń może powodować zmiany ich dróg migracji w środowisku, zmiany współczynników transferu/podziału, wypieranie lub zastępowanie poszczególnych pierwiastków w procesach zachodzących w środowisku w sposób naturalny lub zdeterminowanych działalnością człowieka, w rezultacie wpływając na ostateczny poziom zagrożenia. Klasycznym przykładem jest obecność baru w radonośnych wodach złożowych, która umożliwia współstrącanie baru i radu, w rezultacie prowadząc do istotnej akumulacji radu w osadach.

Wszystkie te okoliczności są istotne dla prawidłowej oceny danej sytuacji związanej z występowaniem promieniotwórczości, jak również na etapie planowania i organizacji działań ograniczających zagrożenie oraz umożliwiających rewitalizację terenów zanieczyszczonych.

W warunkach normalnych, tj. niezwiązanych z sytuacją krytyczną wywołaną awarią lub wypadkiem radiacyjnym, współwystępowanie różnych czynników zagrożenia jest niezwykle istotne w przypadku materiałów zawierających podwyższone stężenie naturalnie występujących nuklidów promieniotwórczych (NORM), odpowiedzialnych za zagrożenie radiacyjne w dziedzinach przemysłu opartych na eksploatacji i przetwórstwie surowców mineralnych, a niezwiązanych bezpośrednio z przemysłem jądrowym i wykorzystaniem źródeł promieniotwórczych.

W ramach projektu RadoNorm prowadzone są badania mające na celu ujednolicenie metod oceny zagrożenia w przypadku współwystępowania różnych czynników zagrożenia, w szczególności w odniesieniu do terenów zanieczyszczonych w wyniku działalności prowadzonej w przeszłości (tzw. legacy sites).

## Literatura

- [1] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [2] Clare Bradshaw, Lawrence Kapustka, Lawrence Barnthouse, Justin Brown, Philippe Ciffroy, Valery Forbes, Stanislav Geras'kin, Ulrik Kautsky, François Bréchignac, Using an Ecosystem Approach to complement protection schemes based on organism-level endpoints, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 136, 2014, Pages 98-104, ISSN 0265-931X, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.017>.
- [3] François Bréchignac, Protection of the environment: how to position radioprotection in an ecological risk assessment perspective, Science of The Total Environment, Volume 307, Issues 1–3, 2003, Pages 35-54, ISSN 0048-9697, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00545-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00545-4).
- [4] National Research Council (US) Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI). Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington (DC): National Academies Press (US); 1999. Appendix C, Tobacco-Smoking and Its Interaction with Radon. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK233257/>

# Dostępne rozwiązania techniczne służące ograniczeniu stężenia radonu w miejscach pracy

K. Wołoszczuk<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej,

Ul. Konwaliowa 7, 03-194 Warszawa

\*e-mail: woloszczuk@clor.waw.pl

**Słowa kluczowe:** radon, ochrona radiologiczna, środki ochrony przed radonem, ograniczanie stężenia radonu

Implementacja zaleceń Dyrektywy Rady 2013/59/EURATOM z dnia 5 grudnia 2013 [1] roku do przepisów krajowych [2] znacząco zmieniła podejście do tematyki ochrony ludności oraz pracowników przed narażeniem na radon i jego pochodne.

Najistotniejsze zmiany prawne, które wywołały daleko idące konsekwencje dla pracodawców oraz osób odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i higienę pracy, to przede wszystkim: ustanowienie poziomu odniesienia średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu na poziomie 300 Bq/m<sup>3</sup> oraz wprowadzenie obowiązku wykonywania pomiarów stężenia radonu w powietrzu w miejscach pracy zlokalizowanych na terenie 27 powiatów uznanych za obszary podwyższonego ryzyka, wskazanych w rozporządzeniu Ministra Zdrowia [3].

Przepisy te, obowiązujące od niespełna sześciu lat, spowodowały znaczący wzrost liczby przeprowadzanych badań i analiz — dotychczas wykonano pomiary stężenia radonu w powietrzu w kilkunastu tysiącach miejsc pracy na terenie kraju. Wyniki tych działań wskazują, że w około 5%–10% kontrolowanych obiektów stwierdzono przekroczenia przyjętego poziomu odniesienia, co w praktyce wiąże się z koniecznością wdrażania odpowiednich działań naprawczych, mających na celu ograniczenie narażenia pracowników na szkodliwy wpływ radonu. Zmiany te przyczyniły się także do wzrostu świadomości zagrożeń radiologicznych oraz potrzeby stosowania skutecznych środków technicznych i organizacyjnych w celu zapewnienia bezpieczeństwa w środowisku pracy.

Prezentacja poświęcona będzie dostępnym rozwiązaniom technicznym służącym ograniczeniu stężenia radonu w miejscach pracy, w kontekście wdrożenia zaleceń przepisów krajowych. Omówione zostaną technologie i środki techniczne stosowane w celu redukcji stężeń radonu w budynkach oraz przykłady efektywnych działań w zakresie ochrony pracowników, w tym środki ochrony indywidualnej.

## Literatura

- [1] Council Directive. 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom.
- [2] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe. Dz.U. 2001 nr 3 poz. 18.
- [3] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia. Dz.U. 2020 poz. 1139.



# Nowatorskie podejście do oznaczania U, Pu i Np metodą kwadрупolowej spektrometrii mas

A. Cwanek<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Instytut Fizyki Jądrowej, Polska Akademia Nauk  
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków*

*\* e-mail: anna.cwanek@ifj.edu.pl*

**Słowa kluczowe:** spektrometria mas, uran, neptun, pluton

Zgodnie z dotychczasową strategią, rutynowa kontrola sytuacji radiologicznej ogranicza się do izotopów promieniotwórczych, które można zidentyfikować za pomocą spektrometrii gamma. Zważywszy na możliwość selektywnego uwalniania skażeń radioaktywnych, w szczególności emiterów alfa, stosowana praktyka może okazać się niewystarczająca do wykrywania specyficznych zdarzeń jądrowych. Aby sprostać tym wyzwaniom, potrzebne jest wdrożenie nowych rozwiązań. Kluczowym zadaniem dla krajowych i międzynarodowych sieci monitorowania bezpieczeństwa jądrowego powinno być włączenie regularnych pomiarów emiterów beta i alfa z uwzględnieniem różnych elementów środowiska.

W odpowiedzi na powyższe zalecenia opracowano i wdrożono szybką metodę oznaczania <sup>235</sup>U, <sup>236</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>237</sup>Np i <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu za pomocą instrumentu Agilent 8900#100 ICP MS/MS (Agilent Technologies) w kombinacji z nebulizatorem desolwującym Apex IR (Elemental Scientific). Przed rozpoczęciem pomiarów zastosowano sekwencyjną procedurę radiochemiczną, obejmującą przede wszystkim mineralizację mikrofalową i chromatografię jonowymienną na złożu polimerowym TEVA lub UTEVA (Triskem International). Standaryzację metody przeprowadzono przy użyciu wzorców radioizotopowych: <sup>239</sup>Pu, <sup>242</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu/<sup>242</sup>Pu, <sup>233</sup>U/<sup>236</sup>U i <sup>236</sup>U/<sup>238</sup>U (NIST, EC-JRC), natomiast w celu zapewnienia kontroli jakości zastosowano materiały referencyjne: IAEA-385 i IAEA-447 (IAEA). Pomiaru przeprowadzono w trybie „energy discrimination” lub „mass shift”, wykorzystując odpowiednio gaz He lub O<sub>2</sub> w komorze kolizyjno-reakcyjnej do eliminacji interferencji poliatomowych i izobarycznych. W rezultacie określono nie tylko stężenie aktywności <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np, <sup>239</sup>Pu i <sup>240</sup>Pu, ale także wartości sygnatur izotopowych <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U, <sup>236</sup>U/<sup>238</sup>U, <sup>236</sup>U/<sup>239</sup>Pu, <sup>237</sup>Np/<sup>239</sup>Pu i <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu. Niskie limity detekcji metody umożliwiają analizę na poziomie nawet kilkudziesięciu femtogramów danego radionuklidu.

# Krajowa sieć stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych

W. Krysiński

*Wydział Monitoringu i Prognozowania*

*Centru do Spraw Zdarzeń Radiacyjnych*

*Państwowa Agencja Atomistyki, ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa*

*e-mail: wojciech.krysinski@paa.gov.pl*

## ***Słowa kluczowe:***

Prezentacja opisuje historię, stan aktualny i planowane działania związane z krajową siecią stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych, administrowaną przez PAA. Sieć składa się z dwóch rodzajów stacji:

- **podstawowych** – prowadzących pomiary, z wykorzystaniem spektrometrii promieniowania gamma, mocy przestrzennego równoważnika dawki  $H^*(10)$  tego promieniowania, w celu wykrycia jej wzrostu o wartość 25 nanosiwertów na godzinę (nSv/h) powyżej wartości średniej za okres 24 godzin poprzedzających pomiar, spowodowanego obecnością sztucznych izotopów gamma promieniotwórczych w otoczeniu, oraz
- **wspomagających** - prowadzących pomiary mocy przestrzennego równoważnika dawki  $H^*(10)$  promieniowania gamma co 1 godzinę oraz określanie średniej wartości mocy przestrzennego równoważnika dawki  $H^*(10)$  promieniowania gamma za okres 24 godzin.

Wspomniane są również inne sieci wczesnego wykrywania skażeń działające w kraju, tj. sieci administrowane przez IMGW, MON i WSSE w Rzeszowie.

# **Czy Twój telefon prawdę o dawce Ci powie? Możliwości i wyzwania zastosowania spektroskopii EPR w szklach ekranów telefonów do retrospektywnego określenia pochłoniętej dawki promieniowania jonizującego po wypadkach radiacyjnych.**

A. Marciniak<sup>1,\*</sup>, M. Juniewicz<sup>1</sup>, B. Ciesielski<sup>1</sup>, Anita Prawdzik-Dampc<sup>2</sup>, Mirosław Sawczak<sup>3</sup>, Jakub Karczewski<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Katedra i Zakład Fizyki i Biofizyki, Gdański Uniwersytet Medyczny, ul. Dębinki 1, 80-211 Gdańsk*

<sup>2</sup>*Katedra i Klinika Onkologii i Radioterapii, Gdański Uniwersytet Medyczny, ul. Mariana Smoluchowskiego 17, 80-214 Gdańsk*

<sup>3</sup>*Zakład Fotofizyki, Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk, ul. Generała Józefa Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk*

<sup>4</sup>*Instytut Nanotechnologii i Inżynierii Materiałowej, Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-222 Gdańsk*

\*e-mail: amarciniak@gumed.edu.pl

**Słowa kluczowe:** EPR, dozymetria, szkło, wypadek radiacyjny, promieniowanie jonizujące

Obecna sytuacja polityczna na świecie, która prowadzi do rosnącego zagrożenia użyciem broni jądrowej, a także ciągły rozwój zastosowania promieniowania jonizującego w przemyśle i medycynie, zwiększają obawy przed potencjalnym narażeniem ludzi na pochłonięcie niekontrolowanych dawek promieniowania jonizującego. Masowe narażenie na promieniowanie osób nie posiadających osobistego dozymetru wymaga segregacji (tzw. triażu) poszkodowanych w celu wdrożenia odpowiednich procedur medycznych. Zgodnie z podpisanym w 2005 roku protokołem METREPOL (Medical Treatment Protocols for Radiation Accident) [1] w czasie pierwszych 48 godzin po wypadku ofiary powinny być objęte systemem segregacji doraźnej, w którym poszkodowani są oceniani zarówno na podstawie danych klinicznych jak i innych kryteriów pozwalających na ocenę pochłoniętej dawki. Narażenie całego ciała lub znacznej jego części na dawkę 4-5 Gy jest potencjalnie śmiertelne dla połowy napromieniowanych ludzi. Specjalistyczna opieka medyczna może znacznie zwiększyć prawdopodobieństwo przeżycia tych, którzy otrzymali dawki rzędu 3–7 Gy na całe ciało. Ponadto, znajomość wielkości dawki pochłoniętej ma szczególne znaczenie przy ocenie ryzyka wystąpienia późnych powikłań oraz efektów stochastycznych.

W ocenie indywidualnych dawek, w celu wsparcia diagnozy czy też wyboru sposobu leczenia, znajduje zastosowanie dozymetria retrospektywna. Jedną z jej metod jest spektroskopia elektronowego rezonansu paramagnetycznego (EPR) polegająca na analizie sygnałów EPR trwałych wolnych rodników wygenerowanych promieniowaniem jonizującym. Dla praktycznego zastosowania metody EPR zasadnicze znaczenie ma wskazanie materiałów mogących pełnić funkcję detektora. Taki materiał powinien spełniać kilka podstawowych wymogów: (1) znajdować się w najbliższym otoczeniu człowieka, (2) wykazywać stabilność sygnału dozymetrycznego, (3) czułość radiacyjna, którą charakteryzuje minimalna wykrywalna dawka (*ang. Detection Limit, DL*) powinna być wystarczająca (1-2 Gy) dla triażu osób poszkodowanych w wypadkach radiacyjnych, (4) jego pobieranie powinno być nieinwazyjne, (5) procedura pomiaru powinna umożliwiać rekonstrukcję dawki w jak najkrótszym czasie (do kilku dni).

Do tej pory metoda spektroskopii EPR była wielokrotnie wykorzystywana do retrospektywnych badań dozymetrycznych w materiałach biologicznych takich jak zęby (np. wielkoskalowe badania ludności po wypadku reaktora w Czarnobylu czy populacji zamieszkującej dawne poligony wojskowe w Semipałatyńsku), kości oraz

paznokcie (dozymetria powypadkowa). Dozymetria EPR w szkliwie zębów jest metodą niezawodną. Pozwala ona na określenie dawek rzędu kilkudziesięciu mGy. Czynnikiem ograniczającym wykorzystanie tych materiałów jest inwazyjność ich poboru, a w przypadku paznokci – niestabilność sygnału EPR i jego wrażliwość na wodę. Dlatego pojawiły się propozycje wykorzystania w dozymetrii EPR niektórych materiałów sztucznych, takich jak tworzywa sztuczne, wata, ceramika, sacharydy, sorbitol czy szkło.

W przeciwieństwie do próbek biologicznych, pozyskanie próbek szkła jest nieinwazyjne, jego próbki są zwykle dostępne w wystarczającej ilości, umożliwiając czułe pomiary EPR. Telefony komórkowe są wszechobecnym przedmiotem osobistego użytku – w 2025 roku liczba ich użytkowników na świecie wynosi około 7,4 miliarda (<https://www.telepolis.pl/tech/sprzet/smartfony-kontra-ludzie-wkrotce-tych-pierwszych-bedzie-wiecej>, dostęp 3 czerwca 2025). Często trzymane są blisko ciała, co jest dodatkowym atutem ułatwiającym odtworzenie dawki pochłoniętej przez ich użytkowników na podstawie dawki zmierzonej w szkłe ekranów ich telefonów. Minimalna wykrywalna dawka (DL) dla szkieł wynosi ok. 0,05-2,00 Gy, co jest wystarczające dla triazu osób poszkodowanych w wypadkach radiacyjnych.

Dotychczas zbadano kilka aspektów dozymetrii EPR w szklach z telefonów: (1) zanik sygnału dozymetrycznego po napromieniowaniu, (2) wpływ preparatyki próbek (kruszenie i traktowanie wodą) na zmiany w ich sygnale EPR oraz (3) oddziaływanie światła UV i temperatury [2].

Wyzwaniem dla dozymetrii EPR w tym materiale jest: (1) różnorodność kształtów ich natywnych sygnałów tła (BG), (2) nakładanie się sygnału tła na sygnał dozymetryczny indukowany promieniowaniem jonizującym, (3) konieczność posiadania modelowych sygnałów danej próbki: tła - BG (*ang. background signal*), sygnału generowanego radiacyjnie - RIS (*ang. radiation-induced signal*) oraz sygnału generowanego światłem - LIS (*ang. light-induced signal*), w celu numerycznego wyekstrahowania składowej dozymetrycznej (RIS) i określenia dawki pochłoniętej w próbce podczas wypadku radiacyjnego.

Opracowana przez nas metoda dawki dodanej i wygrzewania (*ang. added dose&heating method*) pozwala na rekonstrukcję natywnego sygnału BG w napromieniowanych próbkach szkieł zegarkowych mając do dyspozycji jedynie jedną próbkę - tą napromieniowaną w czasie wypadku radiacyjnego [3]. Badania nad zastosowaniem tej metody w szklach z ekranów telefonów oraz nad różnorodnością sygnałów tła są kontynuowane.

## Literatura

- [1] T. M. Fliedner, R. Powles, B. Sirohi, i in. Blood 111(12), 5757 (2008).
- [2] A. Marciniak, B. Ciesielski, M. Juniewicz. Radiat. Environ. Biophys. 61(2), 179 (2022).
- [3] A. Marciniak, M. Juniewicz, B. Ciesielski, A. Prawdzik-Dampc, J. Karczewski, Front Public Health 10, 1063769 (2022).

# Transport materiałów jądrowych

M.Rowińska<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Uniwersyteckie Centrum Kliniczne, ul. Dębinki 7, 80-952 Gdańsk

<sup>2</sup>MERK Sp. z o.o., ul. Mikołaja Reja 3, 80-404 Gdańsk, \*e-mail: mrowinska@uck.gda.pl

**Słowa kluczowe:** transport materiałów jądrowych, materiały rozszczepialne, dozymetria w transporcie, ochrona fizyczna źródeł promieniowania

Potrzeba transportu materiałów jądrowych rośnie wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na świeże paliwo w elektrowniach jądrowych na całym świecie. Plany budowy elektrowni jądrowych w Polsce, kampanie typu „Mały atom, wielka sprawa” powodują, że wzrastać będzie nie tylko potrzeba tranzytowego przewozu materiałów jądrowych przez terytorium RP, ale też krajowa potrzeba przewozu takiego ładunku.

Transport materiałów jądrowych na terenie Rzeczypospolitej Polskiej wymaga posiadania zezwolenia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki na prowadzenie takiej działalności. Wydane zezwolenie dokładnie określa zakres wykonanego transportu. Opisuje rodzaj ładunku, jego kategorię i maksymalne wzbogacenie, ale również rodzaj pojemnika transportowego, w którym ten ładunek może być przewożony. Każda zmiana w zakresie planowanego przewozu wymaga zmiany warunków zezwolenia, a co za tym idzie wniosku, o wydanie zezwolenia lub jego aktualizację. Temat transportu materiałów jądrowych nie jest tematem nowym. Tego typu przewozy odbywały się już wcześniej. Transportowano za równo paliwo jądrowe do reaktora badawczego MARIA w NCBJ jak i odpady w postaci wypalonego paliwa jądrowego z naszego reaktora, które transportem kołowym, lotniczym bądź morskim przekazywane były do składowiska poza naszymi granicami. Prezentację z tego zakresu mieliśmy przyjemność usłyszeć i zobaczyć na spotkaniu SIOR w Ciernej Horze w 2019r. Cała procedura uzyskania zezwolenia wymaga przedstawienia w PAA wielu dokumentów, często są to dokumenty objęte klauzulą poufności.

Zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz. U. z 2021 poz. 1667)[2], dokumenty, które należy załączyć do wniosku to między innymi:

- Program ochrony przed promieniowaniem określony w przepisach o przewozie towarów niebezpiecznych
- Plan ochrony towarów niebezpiecznych dużego ryzyka, w przypadku gdy jest wymagany przez przepisy o przewozie towarów niebezpiecznych.
- W przypadku transportu drogowego – dodatkowo zaświadczenie ADR, jeżeli jest wymagane przez przepisy o przewozie towarów niebezpiecznych.
- Plan zabezpieczenia źródeł promieniotwórczych.
- Informacja o planowanych trasach i sposobie transportu materiałów jądrowych lub wypalonego paliwa jądrowego.
- Projekt systemu ochrony fizycznej materiałów jądrowych.
- Instrukcja załadunku i rozładunku materiałów jądrowych lub wypalonego paliwa jądrowego podczas transportu.
- Informacja o sposobie rozmieszczenia ładunku na środku transportowym.

W chwili obecnej, transport możliwy jest dzięki współpracy wielu jednostek organizacyjnych, realizujących poszczególne etapy takiej procedury. Każdy z elementów transportu wymaga odrębnego zezwolenia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Ładunkiem są kasety przeznaczone do reaktora PWR przewożone w pojemniku transportowym Traveller VVER z paliwem jądrowym niskowz bogaconym (poziom wzbogacenia <5%) umieszczone w kontenerach transportowych 20' (rys.1). Materiał jądrowy przychodzi do Polski na statku dedykowanym do transportu takiego ładunku, następnie przeładowywany jest za pomocą dźwigu portowego z pokładu statku na wagony kolejowe lub naczepy ciągników siodłowych. Pociąg lub konwój z ładunkiem jedzie wyznaczoną trasą z portu do granicy. Na każdym etapie ładunek zabezpieczony jest poprzez odpowiednio dostosowaną do poziomu zagrożenia ochronę fizyczną oraz kontrolowany jest pod względem narażenia na promieniowanie jonizujące (rys.2). Średnie wartości rejestrowane na powierzchni kontenera transportowego oscylują w granicach 5-8uSv/h co świadczy o tym, że ładunek jest bezpieczny. Jeśli procedura przeładunku i

transportu przebiega bez zakłóceń, to ładunek ten jest bezpieczny zarówno dla pracowników, którzy biorą udział w przeładunku i transporcie jak i dla ogółu ludności.



Rysunek 1. Pojemnik transportowy Traveller VVER (źr: <https://westinghousenuclear.com>)



Rysunek 2: Pomiary dozymetryczne pojemnika transportowego (źródło: zasoby własne)

W dobie rosnącego zapotrzebowania na energię i intensywnego rozwoju przemysłu jądrowego nie wolno zapominać o potrzebie przewozu nie tylko paliwa jądrowego, które jest motorem napędowym dla elektrowni, ale również odpadów z takiej działalności. Wydaje się, że nieunikniony jest też rozwój przemysłu przetwórczego dla odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa. Powstanie realna potrzeba transportowania wypalonego paliwa jądrowego z elektrowni do zakładów zajmujących się jego przetwarzaniem.

Równie ważnym jak samo bezpieczeństwo transportowanego ładunku jest edukacja społeczeństwa w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej. Temat energetyki jądrowej często budzi w społeczeństwie lęk, który wynika zarówno z braku edukacji w zakresie fizyki, a szczególnie fizyki atomu, ale również jest wynikiem negatywnych doświadczeń, które dotknęły narody całego świata w wyniku awarii radiacyjnych reaktorów jądrowych. W dobie szeroko rozumianego chaosu medialnego, informacje i dezinformacje o narażeniu jakie towarzyszy pracy z materiałem promieniotwórczym, przeplatają się i efekt takiego przekazu może być losowy. W komentarzach internetowych pod artykułami mówiącymi o zagadnieniach dotyczących materiałów jądrowych i promieniotwórczych przeczytać można zarówno oparte na faktach naukowych wypowiedzi jak i pełne lęku informacje o wielkim zagrożeniu radiacyjnym. Blokowanie przejazdu transportu z materiałem jądrowym powodować może większe narażenie personelu, który w takim transporcie i bierze udział, ale również ogółu ludności, która znajdzie się w miejscu zatrzymania ładunku. By transport był bezpieczny i nie stwarzał zagrożenia dla ludzi i środowiska, powinien przebiegać bez zakłóceń i przy odpowiednim poziomie zabezpieczeń.



Rysunek 3: Transport kołowy materiałów jądrowych (źródło: zasoby własne)

## Literatura

- [1] Ustawa z dn. 29 listopada 2000 r. - Prawo atomowe ([Dz.U. z 2024 poz. 1277](#))
- [2] Rozporządzeniem Rady Ministrów w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz. U. z 2021 poz. 1667)
- [3] Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych ([Dz. U. z 2008 r. poz. 1295](#))

# **$^{241}\text{Am}$ w osadach dennych południowego Bałtyku**

D. Strumińska-Parulska\*<sup>1</sup>, K. Block<sup>1</sup>, Agata Zaborska<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Wydział Chemii,*

*Uniwersytet Gdański, ul. Wita Stwosza 63, 80-308 Gdańsk*

<sup>2</sup>*Zakład Chemii i Biochemii Morza,*

*Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, Powstańców Warszawy 55, 81-712 Sopot*

\**e-mail: dagmara.struminska@ug.edu.pl*

**Słowa kluczowe:**  $^{241}\text{Am}$ , Morze Bałtyckie, osady, sztuczne radionuklidy

Na podstawie uzyskanych wyników oznaczeń  $^{241}\text{Am}$  w datowanych osadach dennych pobranych z trzech głębi Morza Bałtyckiego, zbadano historię akumulacji izotopów w osadach oraz oceniono poziom ich skażenia oraz rozmieszczenie w rdzeniach osadów. Wyniki badań wykazują, że w próbkach osadów dennych pobranych w 2010 roku stężenia aktywności  $^{241}\text{Am}$  w Głębi Gdańskiej wahały się od  $0,009 \pm 0,003$  ( $k=2$ ) do  $0,938 \pm 0,070 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , zaś w Głębi Gotlandzkiej od  $0,024 \pm 0,004$  do  $2,57 \pm 0,19 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . W próbkach osadów dennych pobranych w 2019 roku stężenia aktywności  $^{241}\text{Am}$  w próbkach z Głębi Bornholmskiej mieściły się w zakresie od  $0,030 \pm 0,012$  do  $0,85 \pm 0,06 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , w Głębi Gdańskiej od  $0,24 \pm 0,017$  do  $1,59 \pm 0,12 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , natomiast w Głębi Gotlandzkiej od  $0,017 \pm 0,002$  do  $2,25 \pm 0,16 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Zaobserwowano spadek stężeń aktywności  $^{241}\text{Am}$  wraz z głębokością. Większa zawartość  $^{241}\text{Am}$  w powierzchniowych warstwach osadu może być efektem ciągłego rozpadu promieniotwórczego  $^{241}\text{Pu}$  i powstawania  $^{241}\text{Am}$ . Oznaczone rozmieszczenie  $^{241}\text{Am}$  stanowi cenne źródło informacji o historii radioaktywnego zanieczyszczenia Morza Bałtyckiego i umożliwia ocenę skutków działalności człowieka. Badania wskazują, iż głównym źródłem  $^{241}\text{Am}$  jest rozpad  $^{241}\text{Pu}$  uwolnionego podczas katastrofy elektrowni jądrowej w Czarnobylu.

# $^{210}\text{Po}$ i $^{210}\text{Pb}$ w herbacie i ich bezpieczeństwo radiologiczne

K. Szymańska\*, D. Strumińska-Parulska, A. Moniakowska, G. Olszewski

*Wydział Chemii,*

*Uniwersytet Gdański, ul. Wita Stwosza 63, 80-308 Gdańsk*

\* e-mail: karolina.szymanska@ug.edu.pl

**Słowa kluczowe:**  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , produkty spożywcze, żywność

Herbata jest jednym z najpopularniejszych napojów na świecie. Uwzględniając rosnące zanieczyszczenie środowiska substancjami toksycznymi, takimi jak pestycydy, metale i radionuklidy, kluczowe jest przeprowadzenie badań monitorujących obecność pierwiastków radioaktywnych w środowisku. Zwłaszcza, iż rozporządzenie Rady UE 2016/52/Euratom usystematyzowało graniczne limity zawartości radionuklidów naturalnych, również w żywności. W badaniu przedstawiono zawartość  $^{210}\text{Po}$ , który jest emitерem promieniowania alfa i  $^{210}\text{Pb}$ , emitera promieniowania beta, w 141 gatunkach herbat zebranych w 18 krajach na całym świecie. Roczne dawki skuteczne i ryzyko zachorowania na raka wynikające ze spożywania naparów herbacianych obliczono na podstawie zmierzonych stężeń aktywności. Wyniki badań potwierdzają, że spożywanie badanych herbat jest bezpieczne z perspektywy ochrony radiologicznej ludności.



# Ocena radioaktywności pieprznika jadalnego (*Cantharellus cibarius*) i jej wpływ na zdrowie człowieka

K. Szymańska<sup>1\*</sup>, D. Strumińska-Parulska<sup>1</sup>, A. Moniakowska<sup>1</sup>, J. Falandysz<sup>2</sup>

Wydział Chemii,

<sup>1</sup>Uniwersytet Gdański, ul. Wita Stwosza 63, 80-308 Gdańsk

<sup>2</sup>Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Muszyńskiego 1, 90-151 Łódź

\* e-mail: karolina.szymanska@ug.edu.pl

**Słowa kluczowe:** <sup>210</sup>Po, <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K, żywność, dawka skuteczna

Badania obejmują ocenę stopnia zanieczyszczenia i akumulacji oraz potencjalnego ryzyka zdrowotnego dla konsumentów grzybów z gatunku pieprznik jadalny (kurka) (*Cantharellus cibarius*) radionuklidami <sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Po, <sup>210</sup>Pb i <sup>40</sup>K. Kurki zebrano na terenie Polski, a pomiary aktywności radionuklidów zostały wykonane przy pomocy spektrometrii alfa i gamma. Wartości stężenia aktywności antropogenicznego <sup>137</sup>Cs w grzybach wynosiły od 118 do 1647 Bq·kg<sup>-1</sup> suchej masy (s.m.), podczas gdy dla naturalnego <sup>40</sup>K od 1316 do 1895 Bq·kg<sup>-1</sup> s.m. Stężenia aktywności <sup>210</sup>Po w owocnikach *Cantharellus cibarius* wynosiły od 2,23 do 8,57 Bq·kg<sup>-1</sup> s.m., natomiast w glebie od 11,4 do 83,0 Bq·kg<sup>-1</sup> s.m. Z kolei stężenie <sup>210</sup>Pb mieściło się w przedziale od 1,50 do 6,14 Bq·kg<sup>-1</sup> s.m. w owocnikach i w zakresie 7,74-46,1 Bq·kg<sup>-1</sup> s.m. w glebie. Ocena rocznych dawek skutecznych i ryzyko zachorowania na nowotwór związany z konsumpcją grzybów z gatunku *Cantharellus cibarius* zawierających radionuklidy <sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K, <sup>210</sup>Po i <sup>210</sup>Pb wykazała, że <sup>137</sup>Cs i <sup>210</sup>Po stwarzają podobne ryzyko, zaś ryzyko wynikające z rozpadu <sup>40</sup>K i <sup>210</sup>Pb jest 2-3 rzędy wielkości niższe.

# **Pomiary obywatelskie jako uzupełniająca strategia monitorowania promieniowania jonizującego w zagrożeniach spowodowanych konfliktami zbrojnymi lub klęskami żywiołowymi – studium przypadku w Polsce**

R. Kierepko<sup>1,\*</sup>, M. Krzysiek<sup>1</sup>, A. Mrozik<sup>1</sup>, P. Olko<sup>1</sup>, A. Szumska<sup>1</sup>, J. Helebrant<sup>2</sup>, I. Gomola<sup>3</sup>, P. Fojtík<sup>2</sup>, I. Fojtíková<sup>2</sup>, J. Hůlka<sup>2</sup>, P. Ragan<sup>3</sup>, D. Ruman<sup>3</sup> and M. Davidková<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie (IFJ PAN)*

*ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, Polska*

<sup>2</sup>*National Radiation Protection Institute (SÚRO),*

*Bartoškova 28, 140 00 Praha 4, Czech Republic*

<sup>3</sup>*Slovak Medical University (SMU),*

*Limbová 12, 833 03 Bratislava, Slovakia*

*\*e-mail: renata.kierepko@ifj.edu.pl*

**Słowa kluczowe:** promieniowanie jonizujące, moc dawki, detektory CzechRad, badania obywatelskie

CITISTRA (Citizen measurements as complementary radiation monitoring strategy in threats due to armed conflict or natural disasters) to projekt, którego głównym celem jest ocena wykorzystania potencjału pomiarów obywatelskich jako uzupełnienia już istniejących systemów monitorowania poziomu promieniowania jonizującego w środowisku w sytuacjach kryzysowych. Jest to projekt realizowany w trzech krajach tj. w Polsce, Czechach i na Słowacji. Polska, ze względu na swoje położenie geograficzne (długość granicy z Ukrainą) a także brak elektrowni jądrowych na swoim terytorium stanowi niezwykle ważny element stworzonego konsorcjum.

W ramach projektu detektory promieniowania jonizującego CzechRad, zaprojektowane i wyprodukowane w Czechach (National Radiation Protection Institute - SÚRO) są rozprowadzane wśród wyselekcjonowanych grup społecznych cieszących się zaufaniem wśród obywateli. Detektory te są wyposażone w moduł GPS co pozwala na automatyczne rejestrowanie miejsca pomiaru i nanoszenie wyników na mapy rozkładu mocy dawki. 200 spośród tych detektorów trafiło do Polski i są one systematycznie dystrybuowane wśród jednostek Państwowej Straży Pożarnej i Ochotniczej Straży Pożarnej (PSP i OSP), Wojsk Obrony Terytorialnej (WOT), Stacji Sanitarno – Epidemiologicznych oraz Urzędów Gmin graniczących z Ukrainą i Białorusią. Wszyscy użytkownicy detektorów przechodzą szkolenie w zakresie sposobów wykrywania promieniowania jonizującego, ochrony radiologicznej oraz procedury pomiarowej oraz przesyłu danych do Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN). Projekt realizowany jest w Polsce w pięciu województwach tj. woj. śląskim, małopolskim, świętokrzyskim, podkarpackim i lubelskim, na terytorium ok. 84 000 km<sup>2</sup>.

Oczekiwanym efektem 12-sto miesięcznej kampanii pomiarowej jest monitorowanie poziomu promieniowania jonizującego w środowisku z rozdzielczością lepszą niż jest to realizowane przez istniejące sieci pomiarowe na terenie objętym projektem, wizualizacja pozyskanych danych pomiarowych na ogólnodostępnych i ogólnodostępnych mapach SAFECast, przygotowanie i wdrożenie kilkuset osób w proces pomiarów mocy dawki promieniowania jonizującego, których umiejętności mogą być użyte w sytuacjach kryzysowych, wypracowanie narzędzi, które sprawią, że podobne działania będą mogły być zastosowane na terenie objętym np. planami budowy elektrowni jądrowych.

## **Podziękowania**

Projekt CITISTRA realizowany jest w ramach partnerstwa PIANOFORTE finansowanym z programu EURATOM2027 na podstawie grantu HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01 no.101061037

# Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS - unikatowa placówka w Europie Środkowo-Wschodniej

M. Jaglarz<sup>1\*</sup>, A. Toboła-Galus<sup>1</sup>, A. Jakubowska<sup>1</sup>, D. Raś<sup>1</sup> i J. Szlachetko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS,  
Uniwersytet Jagielloński, ul. Czerwone Maki 98, 30-392 Kraków

\*e-mail: rad.synchrotron@uj.edu.pl

**Słowa kluczowe:** synchrotron, akcelerator liniowy, akcelerator kołowy, dozymetria, ochrona radiologiczna

Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego (NCPS) SOLARIS działa nieprzerwanie od 2015 roku jako jednostka badawcza Uniwersytetu Jagiellońskiego. NCPS jest pierwszym w Polsce i dotychczas jedynym w Europie Środkowo-Wschodniej ośrodkiem oferującym możliwość wykonywania badań z użyciem promieniowania synchrotronowego.

W NCPS SOLARIS znajdują się dwa akceleratory; liniowy oraz kołowy. Akcelerator liniowy przyspiesza wiązkę elektronową wytworzoną w dziale elektronowym. Wiązka ta jest następnie wstrzykiwana do pierścienia akumulacyjnego synchrotronu (akcelerator kołowy), gdzie elektrony osiągają energię 1,5 GeV. Zakrzywienie ich toru w polu magnetycznym (magnesach lub undulatorach), generuje intensywne i szerokopasmowe promieniowanie synchrotronowe, od podczerwieni do promieniowania rentgenowskiego, które kierowane jest następnie na linie badawcze. Dzięki swoim unikalnym właściwościom promieniowanie synchrotronowe wykorzystywane jest w wielu dziedzinach nauki i techniki, takich jak fizyka, chemia, biologia, materiałoznawstwo, a nawet archeologia, umożliwiając szczegółowe badania struktury i właściwości materii na poziomie atomowym i molekularnym. Podstawowym celem działania ośrodka jest udostępnianie infrastruktury badawczej krajowemu i zagranicznemu środowisku naukowemu. Co roku ośrodek gości setki badaczy z całego świata.

W NCPS SOLARIS badania naukowe są obecnie prowadzone na liniach synchrotronowych: PIRX, URANOS, PHELIX, DEMETER, ASTRA, POLYX i CIRI, wykorzystujących światło w zakresie energii fotonów od 0.0125 eV do 16000 eV [1]. Nowo udostępnione linie synchrotronowe POLYX i CIRI zwiększyły możliwości jednostki w zakresie obrazowania struktury powierzchniowej i objętościowej, składu pierwiastkowego oraz faz chemicznych z rozdzielczością mikro – i nanometryczną. Ponadto w NCPS SOLARIS znajdują się dwa kriomikroskopy dedykowane do badań biostrukturalnych.

Z punktu widzenia ochrony radiologicznej jednym z największych wyzwań jest ochrona przed promieniowaniem jonizującym. Jednym ze źródeł jest samo promieniowanie synchrotronowe, wyprowadzane na linie badawcze, na których prowadzone są badania naukowe. Drugim źródłem jest promieniowanie wtórne i rozproszone, które powstaje w wyniku interakcji wiązki elektronów z elementami maszyny, wówczas dochodzi do ich aktywacji, poprzez wytworzenie głównie krótkożyciowych radioizotopów. Zgodne z wymogami polskiego Prawa Atomowego ośrodek zapewnia odpowiedni poziom bezpieczeństwa radiologicznego, poprzez wdrażanie specjalistycznych procedur oraz poprzez ciągły monitoring poziomu promieniowania jonizującego.

W obrębie jednostki środowisko pracy kontrolowane jest z wykorzystaniem termoluminescencyjnych dozymetrów pasywnych (TLD) oraz stacji promieniowania jonizującego (RMS - Radiation Monitoring Station) [2]. Dozymetry środowiskowe TL rozmieszczone są w 64 punktach. Dodatkowo do monitorowania dawek otrzymywanych przez pracowników NCPS SOLARIS, zakwalifikowanych do pracowników kategorii B (aktualnie 125 osób), używane są indywidualne dozymetry TL, odczytywane co 3 miesiące w akredytowanym laboratorium.

Poziomy promieniowania jonizującego są na bieżąco monitorowane przez 12 stacji promieniowania RMS, które wyposażone są w komory jonizacyjne i rozmieszczone w różnych częściach pracowni akceleratorowej. Wybrane stacje są zintegrowane z systemem ochrony ludzi (PSS - Personal Safety System), który w przypadku przekroczenia progów alarmowych automatycznie wyłącza wiązkę lub zamyka tzw. przesłony bezpieczeństwa danej linii eksperymentalnej [3]. System ten kontroluje również dostęp do stref akceleratora, takich jak tunel akceleratora liniowego czy pierścień akumulacyjny, które podczas pracy synchrotronu są niedostępne dla personelu.

Stacje RMS współpracują z aplikacjami do monitorowania i wizualizacji dawek promieniowania w czasie rzeczywistym oraz z systemem archiwizacji danych. Dodatkowo, na terenie ośrodka prowadzone są regularne pomiary dozymetryczne z użyciem przenośnych radiometrów, szczególnie w rejonie pierścienia akumulacyjnego i linii badawczych.

Na podstawie pomiarów oraz raportów z akredytowanego laboratorium badawczego w zakresie pomiarów dawek, poziom promieniowania w NCPS SOLARIS nie przekracza wartości dopuszczalnych dla stref nieklasyfikowanych, co potwierdza wysoki poziom bezpieczeństwa radiologicznego oraz skuteczność wdrożonych procedur.

NCPS SOLARIS jest rozwijany w ramach realizacji projektu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Wsparcie badań i rozwoju z wykorzystaniem infrastruktury badawczej Narodowego Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS” na podstawie umowy nr 1/SOL/2021/2.

## Literatura

- [1] "SOLARIS Centre 2023-2024" report (accessible [www.synchrotron.uj.edu.pl](http://www.synchrotron.uj.edu.pl))
- [2] Magdalena B. Jaglarz, Justyna Wikłacz, Adriana I. Wawrzyniak, "*Radiation safety at Solaris 1.5 GeV storage ring*" IPAC2019, Melbourne, Australia, JACoW Publishing doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-THPRB059
- [3] Magdalena B. Jaglarz, Dagmara Michoń, Barbara Zdrodowska- Pawluś, Krzysztof Wawrzyniak, Mateusz Agustyn, Adriana I. Wawrzyniak „*Radiation Protection and Personal Safety System at SOLARIS National Synchrotron Radiation Centre*” Radsynch23, 11<sup>th</sup> International on Radiation Safety at Synchrotron Sources, ESRF-Grenoble-France, 30 May-2 June 2023

# Novel approach for the ruthenium recovery from spent nuclear fuels via adsorption and liquid-liquid extraction

I.Zuba<sup>1,2</sup>, P.Distler<sup>1</sup>, J.John<sup>1</sup>, M.Seidel<sup>1</sup>

1. Czech Technical University in Prague, Department of Nuclear Chemistry, Brehova 7, Prague, Czech Republic

2. Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Dorodna 16, Warsaw, Poland

e-mail: [iga.zuba@cvut.cz](mailto:iga.zuba@cvut.cz), [igazuba@ichtj.waw.pl](mailto:igazuba@ichtj.waw.pl)

**Keywords:** ruthenium isotopes, adsorption, magnetic adsorbent, MOF-metal organic framework, liquid-liquid extraction

Ruthenium-106 and ruthenium-103 are isotopes related with the nuclear energy – they are fission products produced in nuclear power plants and occurring in the reprocessing process of the spent nuclear fuel [1]. During normal operation of the nuclear power plants, these isotopes are deposited in metallic form, while in emergency situations (extreme conditions: high temperature and oxidizing atmosphere) they easily form volatile oxides and may be released to the environment. Also, relatively large amounts of precious stable Ru are generated in nuclear reactors operation [2]. It was estimated that 1 ton of high-level liquid waste (HLLW) from reprocessing of the spent fuel from a commercial light water reactor (LWR) contains about 4 kg of the light platinum-group metals (PGMs), while 1 ton of HLLW from a fast breeder reactor (FBR) contains about 19 kg of PGMs [3,4]. Among the fission products, ruthenium is one of the most challenging radionuclides to remove, because it forms a large number of complex compounds, it can exist in several oxidation states, it is produced with large fission yield and has a relatively long half-life [5,6]. Another issue is the problem posed by the large amount of ruthenium contained in the high level liquid waste for vitrification. In the vitrification glass, ruthenium can sediment in the forms such as RuO<sub>2</sub> or RuO, which can adversely affect the vitrification process [7]. Taking into account these facts, quantitative separation of Ru from different media is still a challenge.

The aim of the present study was to develop new methods for ruthenium recovery from spent nuclear fuel as well as from radioactive liquid waste. Two separation methods, namely adsorption and liquid-liquid extraction, were used for this purpose. Adsorption of ruthenium was studied on previously prepared adsorbents, magnetic (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@MnO<sub>2</sub>) and metal organic frameworks (Zr-MOF), by radioactive tracer technique. The distribution coefficients ( $K_d$ ) of Ru-103 onto Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@MnO<sub>2</sub> and Zr-MOF were determined in nitric and hydrochloric acid in concentration range 0,01 -1 mol.L<sup>-1</sup>. Additional parameters describing Ru-103 adsorption such as separation factor, adsorption capacity, kinetics and volume-to-mass ratio were determined, too. The second technique for Ru separation studied was liquid-liquid extraction. It was observed that freshly oxidized Ru, most likely in the form of RuO<sub>4</sub>, can be extracted quite efficiently by some organic diluents such as n-dodecane or trichloromethane. Direct extraction by tributylphosphate (TBP) was also tested but seemed to yield inferior results compared to the extraction of oxidized Ru.

We gratefully acknowledge the HORIZON-EURATOM-2021-funded FREDMANS project (GA No. 101060800), SGS project (SGS24/148/OHK4/3T/14) funded by the Czech Technical University in Prague, and the EU and Czech MEYS funded project CROP (CZ.02.01.01/00/22\_011/0008569) for supporting this research.



Co-funded by  
the European Union



## References

1. P.Swain, C.Mallika, R.Srinivasan, U.Kamachi Mudali, R.Natarajan, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 298, 781-796 (2013).
2. A.L. Wright, Report NUREG/CR-6193, Oak Ridge National Laboratory, 1994.
3. F.Li, Y.Shnag, Z.Ding, H.Weng, J.Xiao, M.Lin, Separation and Purification Technology, 182, 9-18 (2017).

4. B.Byerly, L.Tandon, A.Hayes-Sterbenz, P.Martinez, R.Keller, F.Stanley, K.Spencer, M.Thomas, Xu Ning, M.Schappert, J.Fulwyler, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307(3),1871–1876 (2016).
5. H.Kleykamp, *Journal of Nuclear Materials*, 131(2), 221-246 (1985).
6. R.J.M.Konings, T.Wiss and O.Benes, *Nature Materials*, 14(3), 247-252 (2015).
7. C.Laurin, E.Régnier, S.Gossé, A.Laplace, J.Agull, S.Mure, E. Brackx, M.Toplis, O.Pinot, *Journal of Nuclear Materials*, 545, 152650 (2021).

# Wpływ ploidalności na przebieg choroby popromiennej u ekstremofilnej algi *Galdieria sulphuraria*

G. Wałpuski<sup>1\*</sup>, M. Zienkiewicz<sup>1</sup> i Z. Szepliński<sup>2</sup>

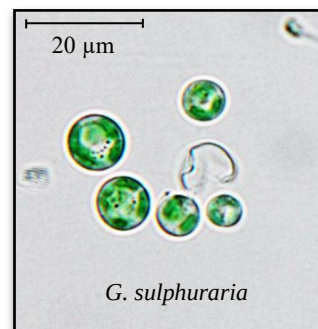
<sup>1</sup>Zakład Molekularnej Fizjologii Roślin, Wydział Biologii, Uniwersytet Warszawski,  
ul. Miecznikowa 1, 02-096, Warszawa, Polska

<sup>2</sup>Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów, Uniwersytet Warszawski,  
ul. Ludwika Pasteura 5A, 02-093, Warszawa, Polska

\*e-mail: g.walpuski@uw.edu.pl

**Słowa kluczowe:** ekstremofile, mikroalgi, Cyanidiophyceae, ploidalność, choroba popromienna

Promieniowanie jonizujące (PJ) ma istotny wpływ na organizmy, gdzie biologiczne skutki zależą głównie od dawki promieniowania oraz obecności mechanizmów obronno-naprawczych w komórkach. Pomimo licznych badań nad wpływem PJ na rośliny, wiedza ta pozostaje niepełna, zwłaszcza jeśli chodzi o mikroalgi. *Galdieria sulphuraria* należąca do klasy Cyanidiophyceae, to niewielki, jednokomórkowy krasnorost przystosowany do życia w ekstremalnych warunkach wulkanicznych źródeł termalnych. Dzięki swoim niezwykłym zdolnościom adaptacyjnym, w tym zdolności do zmiennego sposobu odżywiania (heterotroficznego i autotroficznego) oraz możliwości wzrostu zarówno w fazie haploidalnej, jak i diploidalnej, *G. sulphuraria* stanowi fascynujący model do badań nad wpływem różnorodnych czynników stresowych, w tym promieniowania jonizującego, co pozwoli w zrozumieniu, jak organizmy radzą sobie z ekstremalnymi warunkami środowiskowymi.



Rysunek 1. Ekstremofilna alga *Galdieria sulphuraria*

Celem niniejszych badań było ustalenie wpływu różnej ploidalności tj. haploidalności/diploidalności na przebieg choroby popromiennej u algi *Galdieria sulphuraria* wywołanej napromieniowaniem jednorazową wysoką dawką promieniowania elektronowego (2-6 kGy) w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej. Wyniki stanowią część rezultatów z realizowanej pracy doktorskiej pt. "Wielowymiarowa analiza wpływu promieniowania jonizującego na złożone procesy fizjologiczne u jednokomórkowych, ekstremofilnych glonów".

# Formylowane białka i produkty reaktywne aldehydów jako nowe markery dawek promieniowania

K. E Wójciuk<sup>1\*</sup>, M. Dorosz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zakład Badań Reaktorowych,

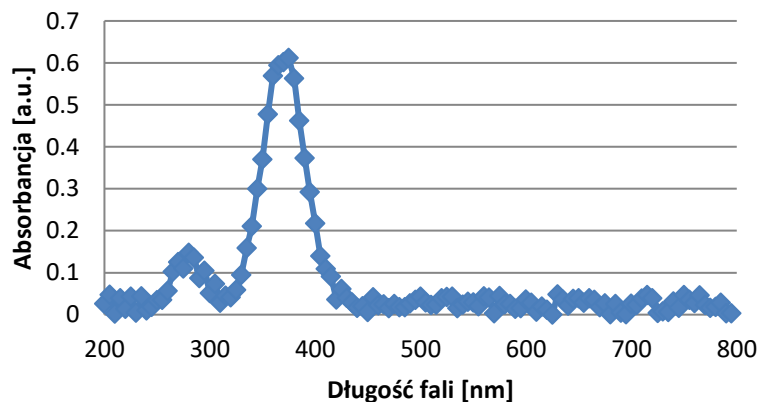
Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ul. ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

\*e-mail: karolina.wojciuk@ncbj.gov.pl

**Słowa kluczowe:** biomarkery promieniowania, formylowanie białek

Celem niniejszego badania jest ocena potencjału formylowanych białek oraz reaktywnych produktów aldehydowych jako biomarkerów do ilościowego oznaczania dawek promieniowania jonizującego. Promieniowanie wywołuje stres oksydacyjny prowadzący do modyfikacji potranslacyjnych białek oraz peroksydacji lipidów, w wyniku której powstają reaktywne aldehydy, takie jak malondialdehyd (MDA) i 4-hydrokso-2-nonenal (4-HNE) [1, 2]. Pomimo, że obecne markery radiacyjne są stosunkowo dobrze poznane, potrzeba nowych, bardziej czułych i specyficznych wskaźników pozostaje aktualna, zwłaszcza do szybkiego monitorowania ekspozycji na promieniowanie [3].

Metodologia obejmuje przygotowanie lizatu komórkowego po ekspozycji na różne dawki promieniowania jonizującego, następnie analizę zawartości formylowanych białek oraz produktów reaktywnych aldehydów za pomocą spektrofotometrii UV-Vis, wykorzystując reakcję z 2,4-dinitrofenylohydrazyną (DNPH) do wykrywania grup karbonylowych [4]. Wstępne wyniki wskazują na wzrost absorpcji przy 370 nm proporcjonalny do dawki promieniowania, co sugeruje akumulację formylowanych białek oraz aldehydowych produktów peroksydacji lipidów [1, 5].



Rysunek1: Przebieg widma absorpcji białek formylowanych

W dalszych etapach planowane jest zastosowanie techniki EPR oraz wysokoczułej spektrometrii masowej i immunochemicznych metod wykrywania specyficznych formylacji w celu potwierdzenia selektywności tych biomarkerów [6]. Dalsze badania skupią się także na ocenie różnic w odpowiedzi w zależności od rodzaju promieniowania oraz w różnych modelach komórkowych. Ostatecznym celem jest opracowanie szybkiego, nieinwazyjnego testu do precyzyjnego określania dawek promieniowania w warunkach klinicznych i środowiskowych.



## Literatura

- [1] Stadtman, E. R., & Levine, R. L. (2003). Free radical-mediated oxidation of free amino acids and amino acid residues in proteins. *Amino Acids*, 25(3–4), 207–218. DOI: 10.1007/s00726-003-0011-2
- [2] Esterbauer, H., Schaur, R. J., & Zollner, H. (1991). Chemistry and biochemistry of 4-hydroxynonenal, malonaldehyde and related aldehydes. *Free Radical Biology and Medicine*, 11(1), 81-128. DOI: 10.1016/0891-5849(91)90192-6
- [3] Goodhead, D. T. (1994). Initial events in the cellular effects of ionizing radiations: clustered damage in DNA. *International Journal of Radiation Biology*, 65(1), 7–17. DOI: 10.1080/09553009414550021
- [4] Levine, R. L., Garland, D., Oliver, C. N., Amici, A., Climent, I., Lenz, A. G., ... & Stadtman, E. R. (1990). Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins. *Methods in Enzymology*, 186, 464-478. DOI: 10.1016/0076-6879(90)86141-h
- [5] Dalle-Donne, I., Rossi, R., Giustarini, D., Milzani, A., & Colombo, R. (2006). Biomarkers of oxidative damage in human disease. *Clinical Chemistry*, 52(4), 601-623. DOI: 10.1373/clinchem.2005.061408
- [6] Jiang, T., Zhou, X., Taghizadeh, K., Dong, M., & Dedon, P. C. (2007). N-formylation of lysine in histone proteins as a secondary modification arising from oxidative DNA damage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(1), 60–65. DOI: 10.1073/pnas.0606775103