

Strategiczna Agenda Badawcza dla Ochrony Radiologicznej w Polsce

Strategic Research Agenda for Radiological Protection in Poland

Pod redakcją: Pawła Olko⁷, Beaty Brzozowskiej²², Michała Gryzińskiego¹⁰, Pawła Krajewskiego², Bogusława Michalika⁴ i Jakuba Ośko¹⁰ ^a

Autorzy: Tomasz Bajda¹, Paweł Bilski⁷, Michał Bończyk⁴, Beata Brzozowska²², Kamil Brzoska⁶, Maciej Budzanowski⁷, Mieczysław Budzyński¹⁹, Anna Cwanek⁷, Marek Dohojda¹⁴, Agnieszka Dołhańczuk-Śródka²⁰, Joanna Domienik-Andrzejewska⁸, Joanna Dudąta¹, Marcin Dybek⁹, Krzysztof Fornalski¹², Michał Gryziński¹⁰, Dominik Grządziel⁷, Marek Janiak, Aleksandra Jung¹, Joanna Kidoń-Szottysek¹⁵, Aleksandra Klimas²⁴, Krzysztof Kozak⁷, Beata Kozłowska²¹, Paweł Krajewski², Marcin Kruszewski⁶, Paweł Lipiński², Jakub Łukas⁷, Mateusz Łukowski⁵, Maciej Maciak¹⁰, Ewa Mandowska¹⁷, Arkadiusz Mandowski¹⁷, Marek Maryański¹¹, Katarzyna Matusiak¹, Jadwiga Mazur⁷, Bogusław Michalik⁴, Brygida Mielewska¹¹, Jerzy Mietelski⁷, Izabela Milcewicz-Mika⁷, Paweł Możejko¹¹, Anna Mrozik⁷, Paweł Olko⁷, Jerzy Olszewski⁸, Jakub Ośko¹⁰, Marcin Pietrzak¹⁰, Tadeusz Przylibski¹³, Ewelina Pyszka⁷, Małgorzata Sankowska⁷, Anna Sas-Bieniarz⁷, Maciej Sobczyk¹, Piotr Sobotka¹², Sylwester Sommer⁶, Dagmara Strumińska-Parulska¹⁶, Zbigniew Surowiec¹⁹, Grzegorz Szaciłowski¹⁰, Katarzyna Szarłowicz¹, Kamil Szewczak⁵, Katarzyna Szufa¹⁷, Mirosław Szytak-Szydłowski¹², Dagmara Tchorz-Trzeciakiewicz²³, Piotr Tulik¹², Michael Waligórski⁷, Janusz Winiecki³, Katarzyna Wołoszczuk², Karolina Wójciuk¹⁰, Yuriy Zorenko¹⁸

- 1) Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
- 2) Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa
- 3) Centrum Onkologii, Bydgoszcz
- 4) Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, Katowice
- 5) Instytut Agrofizyki PAN, Lublin
- 6) Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa
- 7) Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków
- 8) Instytut Medycyny Pracy, Łódź
- 9) Katowickie Centrum Onkologii
- 10) Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock-Świerk
- 11) Politechnika Gdańska
- 12) Politechnika Warszawska
- 13) Politechnika Wrocławska
- 14) Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa
- 15) Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach
- 16) Uniwersytet Gdański
- 17) Uniwersytet Jana Długosza, Częstochowa
- 18) Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz
- 19) Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin
- 20) Uniwersytet Opolski
- 21) Uniwersytet Śląski
- 22) Uniwersytet Warszawski
- 23) Uniwersytet Wrocławski
- 24) Zagłębiowskie Centrum Onkologii, Dąbrowa Górnicza

^a Artykuł zredagowano wg tekstu drugiego wydania „SAB dla OR w Polsce” z lipca 2025 r.

Streszczenie: 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.

Wytyczenie 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 głównych dla Polski priorytetów badawczych w odniesieniu do podobnych inicjatyw europejskich, takich jak opublikowana w 2025 roku 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 na środowisko. 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 Narodowym Centrum Nauki (NCN), w którego obszarze zostaną stworzone trwałe ramy instytucjonalne dla planowego i zrównoważonego rozwoju badań z zakresu OR, odpowiadające zarówno potrzebom nauki, jak i wymogom bezpieczeństwa publicznego.

Summary: *The Strategic Research Agenda (SRA) for Radiological Protection (RP) in Poland was created as a comprehensive plan for the development of basic research aimed at indicating radiological protection research priorities for the next decade, in the context of the growing importance of nuclear energy, medical applications of radiation, and civil and military threats.*

Establishing long-term priorities for research activities will enable the coordination of efforts among various research centres to accomplish the long-term objectives of Poland's science policy. This approach aims to enhance Poland's role in international research projects and develop necessary competencies ahead of the commissioning of the first Polish nuclear power plant, scheduled for 2035. The Agenda aims to outline key research priorities for Poland, aligning with similar European initiatives such as the PIANOFORTE White Paper published in 2025 and the Strategic Research Agenda (SRA) of the European Ionising Radiation Dosimetry Group (EURADOS).

The SRA is divided into four main research areas. The „Human” area mainly concerns the biological effects of radiation, radiotherapy and exposure to cosmic radiation. The area of „Safety” includes the issues of accidents and contamination, radio protectors, as well as psychology and communication of threats. In the „Energy” area, research is postulated that will result in increased work safety in the nuclear industry, better dosimetry and radioactive waste management. In the area of „Environment”, research directions are postulated that will help improve the principles of monitoring, understand the migration of contamination or model the long-term impact of waste. In each of the areas, prospective research directions (perspectives) and corresponding challenges are defined.

RP does not yet have a permanent place in the structure of research funding in Poland. We call for the creation of an interdisciplinary thematic panel at the NCN^b, which would create a permanent institutional framework for the planned and sustainable development of research in the field of RP, meeting both the needs of science and the requirements of public safety.

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Ochrona radiologiczna (OR) to interdyscyplinarna dziedzina nauki, która zajmuje się badaniem i wdrażaniem metod oceny i ograniczania narażenia ludzi oraz środowiska na promieniowanie jonizujące. Postęp w zakresie OR dotyczy nie tylko praktycznego wdrażania metod ograniczania ekspozycji człowieka i środowiska na promieniowanie, ale przede wszystkim poszerzenia wiedzy o mechanizmach i skutkach działania promieniowania. Kluczo-

wą rolę w rozwoju OR odgrywają badania podstawowe, dostarczające fundamentalnej wiedzy na temat oddziaływania promieniowania jonizującego z materią, a w szczególności z organizmami żywymi. Składają się na nie sukcesy nauk przyrodniczych, w szczególności fizyki, chemii, biologii czy geologii, nauk medycznych (medycyny, biologii medycznej, genetyki, epidemiologii, bioinżynierii) oraz nauk o środowisku (ekologii, sozologii, nauki o ziemi). Coraz większą rolę odgrywają nauki matematyczne, w zakresie statystyki i modelowania mechanizmów powstawania zagrożenia, oraz nauki społeczne, szczególnie w za-

^b NCN (Narodowe Centrum Nauki) – National Science Center.

kresie komunikacji zagrożeń oraz ryzyka związanego z ekspozycją na promieniowanie jonizujące.

Strategiczna Agenda Badawcza (SAB) określa najważniejsze cele badawcze w długoterminowej perspektywie, zazwyczaj obejmującej co najmniej najbliższe dziesięciolecie. Chodzi o wskazanie priorytetów i uniknięcie rozproszenia wysiłków różnych ośrodków naukowych dla realizacji długofalowych celów państwa lub danej organizacji. W latach 2010–2020 wieloletnie plany badawcze zostały przygotowane przez tzw. platformy badawcze grupujące instytucje europejskie prowadzące badania w różnych obszarach ochrony radiologicznej. *European Radiation Dosimetry Group* (EURADOS), zrzeszający ponad 80 instytucji europejskich (w tym 4 polskie), opublikował SAB w obszarze dozimetrii w 2010 roku i zaktualizował ją w 2020 [1]. Podobne agendy opublikowały *Multidisciplinary European Low Dose Initiative* (MELODI) [2], *European Platform on preparedness for nuclear and radiological emergency response and recovery* (NERIS) [3], *European Alliance for Medical Radiation Protection Research* (EURAMED) [4], *European Alliance for Radioecology* [5] oraz *Sciences and humanities in ionizing radiation* (SHARE) [6]. Dyrekcja Generalna ds. Badań Naukowych Komisji Europejskiej zgodziła się na ustanawianie priorytetów badawczych z obszaru OR na podstawie tych aktualizowanych agend badawczych. Programy te stanowią podstawę do formułowania polityki naukowej w dziedzinie OR w Europie, a na bieżąco do proponowania priorytetów badawczych w projektach dotyczących OR. Wiele polskich zespołów badawczych uczestniczy aktywnie w międzynarodowych projektach badawczych w tych obszarach, choć bardzo rzadko mają w nich rolę wiodącą.

W marcu 2025 roku Europejskie Partnerstwo na rzecz badań w zakresie ochrony radiologicznej (PIANOFORTE) opublikowało skierowany do Komisji Europejskiej dokument „*The Vital Role of Radiation Protection Research in Europe’s Future*” [7] definiujący podstawowe cele OR w zakresie poprawy zdrowia publicznego i ochrony środowiska, wspierania badań dotyczących OR w celu rozwoju innowacji przemysłowych oraz przygotowania na sytuacje awaryjne. W dokumencie tym podkreślono również znaczenie badań prowadzonych w zakresie OR dla europejskiego programu badawczego na lata 2024–2029, a w szczególności dla działań dotyczących zdrowia człowieka i środowiska, konkurencyjności, społeczeństwa świadomego ryzyka oraz wyboru źródeł energii w celu łagodzenia zmian klimatycznych.

W lipcu 2023 roku zostało zorganizowane w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie sympozjum pt. „Ochrona radiologiczna w Polsce wobec wyzwań Polskiego Programu Energetyki Jądrowej (PPEJ)”. Zaprezentowano wtedy raport Polskiego Konsorcjum Ochrony Radiologicznej (PKOR) [8] dotyczący roli ochrony radiologicznej w Polsce wobec programu PPEJ. Jednym z postulatów sformułowanych podczas sympozjum była potrzeba przygotowania SAB dla

OR w Polsce. Agenda stanowiłaby pomoc merytoryczną dla Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Ministerstwa Klimatu i Środowiska, Ministerstwa Przemysłu oraz dla jednostek finansujących badania w Polsce dotyczące prowadzenia polityki naukowej w obszarze OR oraz w dziedzinach pokrewnych, takich jak fizyka, chemia, biologia, medycyna, geologia i inne. Ma to szczególne znaczenie w świetle perspektywicznego Programu Polskiej Energetyki Jądrowej, rozwoju radioterapii i medycyny nuklearnej czy rosnącego zaangażowania Polskiej Agencji Kosmicznej w działania związane z eksploracją przestrzeni kosmicznej. Dodatkowo, agenda badawcza mogłaby stanowić istotne wsparcie w wyrażaniu polskich potrzeb badawczych w ramach projektów europejskich.

Zmieniające się otoczenie społeczno-polityczne, zwiększająca się liczba państw dysponujących bronią jądrową oraz ponawiane groźby jej użycia przez Federację Rosyjską powodują rosnące zainteresowanie problematyką obrony cywilnej, zarówno z perspektywy monitoringu potencjalnych skażeń promieniotwórczych, jak i sposobów informowania o zagrożeniach. 5 grudnia 2024 roku weszła w życie Ustawa o ochronie ludności i obronie cywilnej, która określa m.in. zasady funkcjonowania i organizację obrony cywilnej w kontekście możliwych zagrożeń, również w wyniku użycia broni masowego rażenia.

W obowiązującym modelu finansowania nauki projekty naukowe z dziedziny OR, ze względu na swój interdyscyplinarny charakter, często napotykają trudności związane z ich właściwą oceną merytoryczną w porównaniu z projektami z obszaru tradycyjnych dyscyplin naukowych. W związku z tym, jednym z kluczowych postulatów raportu PKOR było utworzenie w Narodowym Centrum Nauki panelu tematycznego z zakresu Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej (BJiOR). Utworzenie takiego panelu umożliwiłoby stworzenie trwałych ram instytucjonalnych dla planowego i zrównoważonego rozwoju badań z zakresu BJOR, odpowiadających zarówno potrzebom nauki, jak i wymogom bezpieczeństwa publicznego oraz, jako naturalną konsekwencję, bardziej adekwatną ocenę projektów badawczych w tym obszarze.

1.2. Cele

Rozwój energetyki jądrowej (opartej zarówno na dużych reaktorach energetycznych, jak i rozproszonych geograficznie małych reaktorach modułowych), doskonalenie nowych technologii generacji promieniowania (takich jak akceleratory i lasery dużej mocy), poszukiwanie nowych źródeł energii (np. energetyka termojądrowa), a także gwałtowny postęp zastosowań promieniowania jonizującego w radioterapii i diagnostyce medycznej generują szereg nowych wyzwań w zakresie OR. Równolegle zagadnienia związane z bezpiecznym składowaniem i przetwarzaniem odpadów promieniotwórczych oraz rosnące zainteresowanie eksploracją przestrzeni kosmicznej wymagają opracowania zintegrowanego, nowego podejścia do pod-

stawowych zagadnień OR, w szczególności w kontekście oceny ryzyka wywołanego ekspozycją na promieniowanie oraz różnic w skuteczności biologicznej poszczególnych rodzajów promieniowania. Jest to również istotne w związku z wprowadzaniem do medycyny nuklearnej nowych nuklidów promieniotwórczych czy występowaniem w bezpośrednim otoczeniu człowieka i w środowisku pracy materiałów zawierających podwyższone stężenie naturalnych nuklidów promieniotwórczych.

Właśnie zagadnienia biologicznych skutków ekspozycji człowieka na promieniowanie jonizujące są najbardziej kontrowersyjną dziedziną badań podstawowych. Ścierają się tam poglądy zwolenników modelu bezprogowej odpowiedzi liniowej (*Linear Non Threshold, LNT*), zakładającego, że każda, nawet najmniejsza dawka promieniowania jonizującego niesie ryzyko indukcji choroby nowotworowej, z koncepcjami sugerującymi istnienie mechanizmów odpowiedzi adaptacyjnej (według których niskie dawki promieniowania mogą aktywować systemy odpornościowe organizmu i zwiększać jego odporność na kolejne ekspozycje) oraz z hipotezą hormezy radiacyjnej, postulującej potencjalne korzystne efekty działania bardzo niskich dawek promieniowania. Wyniki tych badań mogą mieć bezpośrednie przełożenie na powiązanie poziomów i rodzajów ekspozycji z ich ewentualnymi negatywnymi konsekwencjami, jak również wpływ na zmiany w samym systemie ochrony radiologicznej.

Celem niniejszej Strategicznej Agendy Badawczej jest wytyczenie perspektywicznych kierunków działalności naukowej, których rozwój w nadchodzącej dekadzie umożliwi wzmocnienie krajowych kompetencji w obszarze OR, w tym również w zakresie wpływu energetyki jądrowej na człowieka i środowisko. Kluczowym elementem jest identyfikacja istniejących luk i potrzeb w zakresie dalszych prac naukowych oraz rozwiązywanie nowych, pojawia-

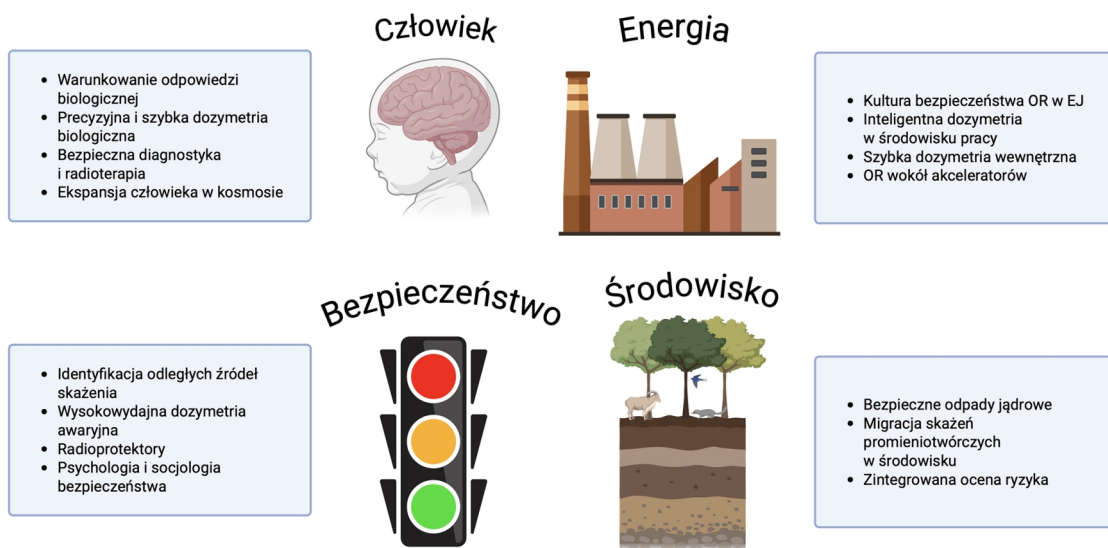
jących się wyzwań w dziedzinie szeroko rozumianej OR. Realizacja SAB przyczyni się do zwiększenia potencjału merytorycznego i operacyjnego polskich zespołów badawczych w Polsce przed uruchomieniem pierwszej elektrowni jądrowej w 2035 roku.

Agenda korzystnie wpłynie na udział polskich jednostek naukowych w procesie kształtowania nowych programów badawczych na szczeblu europejskim. Obecnie Polska otrzymuje do konsultacji z Komisji Europejskiej gotowe dokumenty określające priorytety badawcze w kolejnych programach ramowych oraz w ramach traktatu EUR-ATOM. Dokumenty te są często opracowywane z uwzględnieniem interesu i potencjału badawczego wybranych państw członkowskich, ośrodków naukowych lub zespołów badawczych. Posiadanie własnej SAB umożliwi polskim organizacjom proaktywne uczestnictwo w procesie tworzenia programów badawczych Unii Europejskiej, zwiększając szanse na realizację projektów odpowiadających rzeczywistym potrzebom i priorytetom badawczym Polski oraz regionu Europy Środkowo-Wschodniej.

1.3. Kierunki badawcze: obszary, perspektywy i wyzwania

Badania w zakresie ochrony radiologicznej są z natury rzeczy interdyscyplinarne, integrując wiedzę i metodykę z wielu obszarów nauki. Obejmują one zagadnienia z zakresu nauk przyrodniczych, medycznych, nauk o środowisku, nauk matematycznych oraz społecznych.

W niniejszym dokumencie został zaproponowany podział tematyki badawczej na cztery kluczowe obszary: „Człowiek”, „Energia”, „Bezpieczeństwo”, „Środowisko” (rys. 1). Podział ten, choć przyjęty arbitralnie, odzwierciedla główne kierunki badań związanych z OR, umożliwiając jednocześnie strukturalne uporządkowanie priorytetów badawczych. Obszar **Człowiek** dotyczy w większości bio-



Rys. 1. Perspektywiczne kierunki badawcze dla ochrony radiologicznej w obszarach CZŁOWIEK, ENERGIA, BEZPIECZEŃSTWO i ŚRODOWISKO (opracowanie własne).

Fig. 1. Prospective research directions ("perspectives") for radiological protection in the areas of HUMAN, ENERGY, SAFETY and ENVIRONMENT (own study).

logicznych i medycznych aspektów oddziaływania promieniowania jonizującego. Obszar **Energia** koncentruje się na energetyce jądrowej i jej wpływie na ludzi, florę i faunę oraz na gospodarce odpadami promieniotwórczymi. Obszar **Bezpieczeństwo** dotyczy wszelkich aspektów ochrony radiologicznej związanych z awariami jądrowymi, aktami terrorystycznymi i użyciem broni jądrowej. Obszar **Środowisko** obejmuje głównie wyspecjalizowane metody monitorowania poziomów promieniotwórczości, transferu nuklidów i wskaźniki zmian środowiska. Obszary te wielokrotnie się przenikają, a ich wspólnym mianownikiem jest zapewnienie bezpieczeństwa przy szeroko rozumianej ekspozycji na promieniowanie jonizujące.

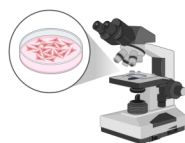
W każdym z tych obszarów formułowane są perspektywiczne kierunki działalności naukowej (perspektywy), mające wskazać główne kierunki badań, w które, ze względu na wagę naukową i interes społeczny, warto inwestować w ciągu najbliższej dekady. W ramach każdej perspektywy proponowane są również przykładowe potrzeby i wyzwania, które mogą stanowić przedmiot poszczególnych projektów.

2. Strategiczna Agenda Badawcza

2.1. Obszar „Człowiek”

Badania oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm człowieka należą do najtrudniejszych i jednych z najbardziej kontrowersyjnych zagadnień współczesnej nauki. Prowadzone są one na pograniczu radiobiologii, mikrodozymetrii i fizyki medycznej. Badania dotyczące biologicznych efektów działania niskich dawek promieniowania nie przynoszą jednoznacznych wyników, a zagadnienie to ma kluczowe znaczenie dla podstaw OR. Jednocześnie, w kontekście stosowania dużych dawek promieniowania w procedurach medycznych coraz wyraźniej dostrzega się konieczność ich indywidualizacji, uwzględniającej zarówno cechy biologiczne pacjenta, jak i charakterystykę konkretnej terapii. Rośnie też zainteresowanie badaniami w zakresie obecności człowieka w kosmosie, gdzie wysokoenergetyczne promieniowanie kosmiczne może stanowić jeden z głównych czynników ryzyka w lotach międzyplanetarnych.

Perspektywa 2.1-1: Warunkowanie odpowiedzi biologicznej na działanie promieniowania.
Perspective 2.1-1: Conditioning the biological response to radiation.



Ta perspektywa obejmuje pogłębienie wiedzy na temat molekularnych, komórkowych i genetycznych mechanizmów odpowiedzi organizmu człowieka na promieniowanie jonizujące. Zrozumienie tych mechanizmów pozwoli na opracowanie nowych strategii ochrony przed szkodliwymi skutkami promieniowania, a także na poprawę precyzji i skuteczności technik radioterapeutycznych, zarówno w kontekście leczenia nowotworów, jak i ochrony zdro-

wych tkanek. Badania te mogą również doprowadzić do rozwoju nowych biomarkerów i modeli biofizycznych/numerycznych, które będą wykorzystywane w medycynie do monitorowania i przewidywania odpowiedzi organizmu na promieniowanie.

- *Wyzwanie 1: Identyfikacja szczegółowych mechanizmów, które warunkują odpowiedź komórek na promieniowanie jonizujące, w tym na poziomie kwasów nukleinowych, białek, lipidów struktur wewnątrz- i zewnątrzkomórkowych (egzosomów).*
- *Wyzwanie 2: Badanie promieniowrażliwości osobniczej i czynników modulujących indywidualną odpowiedź na promieniowanie jonizujące (radioprotektory i radiouczulacze, adaptacja na niskie dawki).*
- *Wyzwanie 3: Badania nad molekularnymi mechanizmami działania nanostruktur i nanosystemów w kontekście ochrony zdrowych komórek przed uszkodzeniami lub wspomaganiami naprawy DNA w komórkach, które zostały uszkodzone przez promieniowanie.*
- *Wyzwanie 4: Poznanie mechanizmów indywidualnej odpowiedzi organizmu na różne sposoby dostarczania dawki promieniowania jonizującego (technika FLASH, promieniowanie mieszane, frakcjonowanie).*

Perspektywa 2.1-2: Szybka dozymetria biologiczna do oceny ekspozycji człowieka w sytuacji awaryjnej.
Perspective 2.1-2: Rapid biological dosimetry to assess human exposure to emergency situations.



Ta perspektywa koncentruje się na wykorzystaniu badań radiobiologicznych do opracowania metod umożliwiających ocenę dawki promieniowania post factum, tzw. dozymetrii retrospektywnej, która jest kluczowa w momencie zaistnienia wypadku radiacyjnego lub awarii jądrowej. Podstawowymi problemami obecnie stosowanych metod są: długi czas wykonywania pomiarów, stosunkowo niska czułość, wysoki poziom komplikacji uniemożliwiający ich masowe zastosowanie.

- *Wyzwanie 1: Automatyzacja i zastosowanie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do analizy uszkodzeń DNA i innych biomarkerów.*
- *Wyzwanie 2: Cytogenetyka FISH, m-FISH, m-BAND, PCC do celów dozymetrii biologicznej.*
- *Wyzwanie 3: Określenie bazowego poziomu markerów biodozymetrycznych oraz zakresów i powodów ich fluktuacji w populacji środkowoeuropejskiej.*

Perspektywa 2.1-3: Bezpieczna diagnostyka i radioterapia.
Perspective 2.1-3: Safe diagnostics and radiotherapy.



Promieniowanie jonizujące wykorzystywane w diagnostyce i leczeniu pacjentów onkologicznych nie jest selektywne – może wpływać również na zdrowe komórki i tkanki,

prowadząc do uszkodzeń genetycznych, zaburzeń funkcjonowania narządów, a nawet rozwoju nowotworów wtórnych. Rozwój nowoczesnej diagnostyki i radioterapii wiąże się z ciągłą potrzebą poprawy dokładności, bezpieczeństwa i skuteczności procedur, przy jednoczesnym minimalizowaniu ryzyka związanego z ekspozycją na promieniowanie jonizujące. Pomimo zaawansowanych technologii, takich jak tomoterapia czy protonoterapia, nadal istnieje ryzyko niezamierzonego uszkodzenia zdrowych tkanek, szczególnie w bezpośrednim sąsiedztwie nowotworów.

- *Wyzwanie 1: Opracowanie dokładnych modeli biodozymetrycznych pozwalających na monitorowanie dawki promieniowania w czasie rzeczywistym.*
- *Wyzwanie 2: Badania możliwości redukcji dawek promieniowania rozproszonego w nowoczesnych metodach radioterapii onkologicznej.*
- *Wyzwanie 3: Opracowanie nowych materiałów tkankopodobnych, z uwzględnieniem technologii druku 3D, do weryfikacji i personalizacji radioterapii.*
- *Wyzwanie 4: Innowacyjne radiofarmaceutyki dla medycyny spersonalizowanej w diagnostyce i radioizotopowej terapii celowanej.*
- *Wyzwanie 5: Modelowanie procesów radiobiologicznych uwzględniających skuteczność biologiczną różnych rodzajów promieniowania oraz interakcje fizykochemiczne w skali nanometrycznej, jako podstawa do dalszego rozwoju biologicznie ukierunkowanego planowania radioterapii.*

Perspektywa 2.1-4: Ekspansja człowieka w kosmosie.

Perspective 2.1-4: Human expansion in space.



Promieniowanie kosmiczne jest jednym z głównych czynników środowiskowych ograniczających możliwości długotrwałego przebywania człowieka w przestrzeni kosmicznej, w szczególności poza orbitą Ziemi. W środowisku naukowym brakuje porozumienia co do zasad prowadzenia ochrony radiologicznej w przestrzeni kosmicznej, a poszczególne agencje kosmiczne prowadzą własną politykę w tym zakresie. Kierunki badań powinny dotyczyć zarówno metod zmniejszenia ekspozycji, jak i metod ograniczenia skutków napromieniowania (radioprotektory, radiomodulatory) oraz postępowania po ekspozycji. Do wypracowania oceny ryzyka w warunkach ekspozycji na promieniowanie kosmiczne niezbędne są zarówno modele matematyczne umożliwiające symulację zachodzących zjawisk, jak i eksperymenty radiobiologiczne. Osobnym zagadnieniem jest problem odporności elektroniki na promieniowanie kosmiczne, szczególnie na promieniowanie wtórne, generowane w wyniku oddziaływania wysokoenergetycznych cząstek z materiałem statku kosmicznego.

- *Wyzwanie 1: Opracowanie modeli radiobiologicznych dla oceny skutków ostrej i przewlekłej ekspozycji na promieniowanie kosmiczne.*
- *Wyzwanie 2: Badanie oddziaływania promieniowania słonecznego i galaktycznego o różnym składzie widmowym na człowieka i elektronikę.*
- *Wyzwanie 3: Badanie niezawodności układów elektronicznych w warunkach przewlekłej i ostrej ekspozycji na promieniowanie kosmiczne.*
- *Wyzwanie 4: Badanie zjawisk elektrycznych i optycznych powodowanych przez promieniowanie jonizujące w materiałach półprzewodnikowych, scyntylatorach, kryształach luminescencyjnych dla innowacyjnych metod detekcji, spektrometrii, dozymetrii promieniowania kosmicznego.*
- *Wyzwanie 5: Badania nad wzrostem roślin w warunkach ekspozycji na wysokoenergetyczne promieniowanie kosmiczne.*
- *Wyzwanie 6: Badanie składu i promieniotwórczości skał i regolitów pochodzenia pozaziemskiego.*
- *Wyzwanie 7: Symulacja promieniowania kosmicznego z wykorzystaniem akceleratorów.*

2.2. Obszar „Bezpieczeństwo”

Zwiększające się ryzyko konfliktu jądrowego, ataku na instalacje jądrowe czy skażenia z użyciem brudnej bomby nadaje wysoki priorytet badaniom dotyczącym bezpieczeństwa radiologicznego. Jednym z priorytetów jest badanie mechanizmów transportu skażeń promieniotwórczych w środowisku, które w połączeniu z rozwojem fizyki atmosfery i ultraczułymi metodami detekcji nuklidów promieniotwórczych umożliwi wczesne wykrywanie skażeń oraz pozwoli na identyfikację zarówno miejsca emisji skażeń, jak i pierwotnej wartości emisji. Niezmiernie ważne jest poszukiwanie bardziej wydajnych wskaźników, umożliwiających ocenę w krótkim czasie ekspozycji dużej liczby osób.

Perspektywa 2.2-1: Identyfikacja odległych źródeł skażeń.

Perspective 2.2-1: Identifying remote sources of contamination.



Współczesne metody monitoringu powietrza umożliwiają wykrywanie śladowego stężenia pierwiastków promieniotwórczych. Prowadzenie badań i testów z substancjami promieniotwórczymi powoduje uwolnienia, które mogą być wykrywane z dużych odległości. Takie zdarzenia wystąpiły np. w 2017 roku podczas niekontrolowanego uwolnienia Ru-106 na terenie południowego Uralu oraz podczas nieudanej próby pocisku o napędzie jądrowym Burevestnik na poligonie Nyonoksa w 2019 roku. Również poszczególne typy reaktorów jądrowych mogą mieć swoją unikatową sygnaturę uwolnień, co stwierdzono m.in. podczas katastrofy w Fukushima. Określenie skali emisji substancji promieniotwórczych oraz ich składu na podstawie

pomiarów wykonywanych w dużej odległości od źródła umożliwia wczesne wykrycie i monitorowanie awarii lub działań związanych z wykorzystaniem technologii jądrowych lub źródeł promieniotwórczych prowadzonych poza uzgodnieniami wynikającymi z traktatów międzynarodowych.

- *Wyzwanie 1: Metody analizy danych wielopunktowej detekcji skażeń do identyfikacji miejsca emisji, źródła i skali emisji pierwiastków promieniotwórczych.*
- *Wyzwanie 2: Określenie stechiometrii nuklidów antropogenicznych i naturalnych w celu określenia pochodzenia źródeł skażeń promieniotwórczych.*
- *Wyzwanie 3: Selektywne metody detekcji i spektrometrii nuklidów promieniotwórczych z wykorzystaniem dronów powietrznych, lądowych i morskich.*

Perspektywa 2.2-2: Wysokowydajna dozymetria awaryjna.
Perspective 2.2-2: High-performance emergency dosimetry.



W przypadku ekspozycji populacji na wysokie dawki promieniowania do podjęcia ewentualnego leczenia konieczne jest przeprowadzenie szybkiej, liczonej w godzinach, oceny dawek indywidualnych. Obecnie stosowane metody dozymetrii awaryjnej nie pozwalają na taką ocenę w przypadku ekspozycji setek lub tysięcy osób. Poszukiwania zjawisk fizycznych i chemicznych, znalezienie materiałów i opracowanie szybkich metod pomiarowych powinno wydatnie zwiększyć możliwości szybkiego triażu poszkodowanych poddanych ekspozycji na nieznane dawki promieniowania jonizującego. Taka szybka ocena dawek pochłoniętych u osób napromieniowanych może też zapobiec wybuchowi paniki.

- *Wyzwanie 1: Poszukiwanie sygnatury zjawisk, która umożliwi ocenę dawki pochłoniętej na podstawie szybkiego fizycznego screeningu elementów ubioru lub wyposażenia dnia codziennego.*
- *Wyzwanie 2: Fizyczna dozymetria awaryjna dla ekspozycji na promieniowanie neutronowe.*
- *Wyzwanie 3: Koncepcje algorytmów i modeli matematycznych dla analizy danych środowiskowych i czasów ekspozycji wspomagających automatyczny triaż radiacyjny.*



Perspektywa 2.2-3: Radioprotektory.
Perspective 2.2-3: Radio-protectors.

Radioprotektory to substancje ograniczające ekspozycję na promieniowanie związane z wniknięciem nuklidów promieniotwórczych lub zmniejszające negatywne skutki ekspozycji na wysokie dawki promieniowania jonizującego. Jednym z przykładów powszechnie znanego radioprotektora jest jodek potasu, stosowany w celu ochrony tarczycy

przed wychwytem radioaktywnego jodu. Radioprotektory stosowane są również w celu redukcji liczby wolnych rodników, uszkadzających DNA, białka i błony komórkowe, a także wspierania mechanizmów naprawy komórek oraz zmniejszenia apoptozy zdrowych komórek i łagodzenia stanów zapalnych po napromienieniu. Oprócz amifostyny, stosowanej w radioterapii, pewne właściwości chroniące przed promieniowaniem wykazują nanocząstki złota, witamina E, selen i inne substancje.

- *Wyzwanie 1: Poznanie mechanizmów i opracowanie celowanych radioprotektorów, które działają głównie w zdrowych tkankach, a nie w nowotworach.*
- *Wyzwanie 2: Opracowanie radioprotektorów do zastosowań masowych, w szczególności dla wojska, ratowników w zdarzeniach radiacyjnych, astronautów etc.*

Perspektywa 2.2-4: Psychologia i socjologia bezpieczeństwa.
Perspective 2.2-4: Psychology and sociology of security.



W przypadku wypadków radiacyjnych łatwo o wybuch paniki, a fałszywe informacje i teorie spiskowe rozpowszechniane przez media społecznościowe mogą łatwo wpłynąć na skuteczność działań ochronnych. Aby zapobiec wybuchom paniki, w sytuacjach awaryjnych kluczowe jest zaufanie do władz, służby zdrowia, naukowców i ekspertów. Błędy w komunikacji społecznej po katastrofie reaktora w Czarnobylu, polegające na ukrywaniu prawdziwych danych, skutkowały pojawieniem się długotrwałej nieufności do oficjalnych źródeł przekazu. W przypadku wypadków z dużą liczbą ofiar może też nastąpić stygmatyzacja i wykluczenie osób z terenów skażonych. Po takich wydarzeniach mogą wystąpić też objawy stresu pourazowego, lęku i depresji nawet u osób niebędących fizycznie napromieniowanymi, co może pogarszać zdrowie bardziej niż samo promieniowanie. Celem badań będzie zrozumienie mechanizmów i wypracowanie zasad i metod komunikacji w warunkach normalnego stosowania źródeł promieniowania oraz po wystąpieniu zdarzenia radiacyjnego, katastrofy czy wybuchu konfliktu z użyciem broni masowego rażenia.

- *Wyzwanie 1: Opracowanie metod edukacyjnych, dostosowanych do poziomu wiedzy społeczeństwa, służących budowaniu zaufania do instytucji i ekspertów.*
- *Wyzwanie 2: Badanie percepcji ryzyka związanego z ekspozycją na promieniowanie dla różnych grup społecznych (wiek, wykształcenie, zawód).*
- *Wyzwanie 3: Wypracowanie metod określenia gotowości służb państwowych oraz personelu medycznego do pracy w warunkach zagrożenia radiacyjnego.*

2.3. Obszar „Energia”

Szeroko rozumiana ochrona radiologiczna w energetyce jądrowej ma na celu zapewnienie bezpieczeństwa pracowników, społeczeństwa i środowiska w warunkach normalnej eksploatacji i w sytuacji awaryjnej w elektrowni jądrowej (EJ) oraz przy długoterminowym zarządzaniu odpadami promieniotwórczymi. Jednym z elementów zapewnienia bezpieczeństwa radiologicznego pracownikom, ludności i środowisku jest przygotowanie wielopoziomowego systemu ochrony radiologicznej, obejmującego aspekty biologiczne, medyczne, organizacyjne i społeczne. Budowa elektrowni jądrowych jest jednym z największych wyzwań cywilizacyjnych współczesnej Polski. Realizowany jest projekt budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej w Lubiatowie-Kopalinie z reaktorami jądrowymi AP1000 firmy *Westinghouse Electric Company* oraz rozważana jest budowa szeregu małych reaktorów modułowych BWRX-300. Akceptacja społeczna tego przedsięwzięcia jest nierozdzielnie związana z bezpieczeństwem korzystania z tego źródła energii. Badania naukowe, prowadzone w celu zwiększenia bezpieczeństwa radiologicznego w związku z działalnością energetyki jądrowej, powinny łączyć nauki podstawowe (materiałoznawstwo, biologię, fizykę), nauki społeczne (psychologia, socjologia) i nowoczesne technologie (AI, czujniki, robotyka).

Perspektywa 2.3-1: Kultura bezpieczeństwa ochrony radiologicznej w energetyce jądrowej.
Perspective 2.3-1: Radiation protection safety culture in the nuclear industry.



Jedną z przyczyn wypadków, w tym wypadków radiacyjnych, są błędy człowieka i brak poszanowania reguł i postępowania zgodnie z instrukcjami pracy. Tak doszło m.in. do katastrofy reaktora w Czarnobylu, w którym obsługa reaktora prowadziła testy reaktora bez odpowiedniego przygotowania, ignorując zasady operacyjne i wyłączając systemy bezpieczeństwa. Badania nad przestrzeganiem procedur przez personel i przyczynami błędów operacyjnych są nieodzownym elementem mozaiki gwarantującej bezpieczną pracę elektrowni jądrowych. Dotyczy to również osób odpowiedzialnych za monitorowanie bezpieczeństwa radiacyjnego na terenie EJ. Celem tych badań jest poznanie przyczyn, a w dalszej kolejności wypracowanie metod eliminacji błędów ludzkich jako powodów incydentów.

- *Wyzwanie 1: Wypracowanie wskaźników i narzędzi do obiektywnej oceny zasad kultury bezpieczeństwa w energetyce jądrowej.*
- *Wyzwanie 2: Zbadanie zjawiska znieczulenia na zagrożenie przy długim okresie bez incydentów i wypracowanie metod jego eliminacji.*

Perspektywa 2.3-2: Inteligentna dozymetria w środowisku pracy.
Perspective 2.3-2: Intelligent Dosimetry in the Work Environment.



Personel elektrowni jądrowej jest objęty rutynowym monitorowaniem zewnętrznego i wewnętrznego narażenia na promieniowanie jonizujące, prowadzonym przez akredytowane laboratoria dozymetryczne. Pomiary dawek od źródeł zewnętrznych prowadzone są na ogół z wykorzystaniem pasywnych dawkomierzy luminescencyjnych (TL, OSL), osobistych dawkomierzy elektronicznych (EPD) oraz monitorów środowiska. Istotną trudnością w pomiarach dozymetrycznych jest też potrzeba zapewnienia pomiarów dla mocy dawek zmieniających się od poziomu tła naturalnego do wartości ekstremalnie wysokich. Integracja wyników pochodzących z różnych systemów pomiarowych nie jest na ogół prosta i nie umożliwia retrospektywnej analizy przyczyn, miejsc i skali ekspozycji. Inteligentny, zintegrowany system dozymetryczny EJ umożliwiłby lepszą rekonstrukcję dawki dla poszczególnych członków personelu, szczególnie w warunkach zdarzenia radiacyjnego. W przypadku sytuacji awaryjnych w ocenie dawki efektywnej celowe jest wykorzystanie modeli matematycznych umożliwiających symulację w czasie rzeczywistym dawki skutecznej w oparciu o fantomy numeryczne człowieka.

- *Wyzwanie 1: Systemy szybkiego uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji do analizy i syntezy ekspozycji z wielu systemów pomiarowych.*
- *Wyzwanie 2: Inteligentne czujniki i dawkomierze z transmisją danych do monitorowania dawek w polu promieniowania mieszanego.*
- *Wyzwanie 3: Rozwój algorytmów i modeli matematycznych do symulacji w czasie rzeczywistym transportu promieniowania w środowisku, zintegrowanych z zaawansowanymi fantomami numerycznymi do oceny dawki skutecznej.*
- *Wyzwanie 4: Identyfikacja dynamicznych zmian ekspozycji na promieniowanie jonizujące w środowisku pracy w EJ.*

Perspektywa 2.3-3: Metody szybkiej oceny ekspozycji wewnętrznej dla personelu EJ i ogółu ludności.
Perspective 2.3-3: Rapid internal dosimetry for NPP staff and the general public.

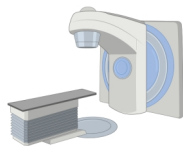


Elektrownie jądrowe, nawet podczas normalnej eksploatacji, są źródłem emisji nuklidów promieniotwórczych do środowiska. Wielkość tej emisji jest w sposób ciągły monitorowana i porównywana z limitami uwolnień ustalonymi dla danej EJ. Rozwój metod pomiaru stężenia substancji promieniotwórczych w środowisku pozwala na dokładniejsze przewidywanie ilości substancji, która wniknęła drogą

pokarmową lub oddechową. Stosowane obecnie metody pomiaru obecności substancji promieniotwórczych w organizmie, takie jak pomiary licznikiem całego ciała czy badanie stężenia nuklidów promieniotwórczych w płynach fizjologicznych, są długotrwałe i nie mogą być szybko wykonane dla licznej populacji.

- *Wyzwanie 1: Algorytmy oceny wniknięcia i skutecznej dawki obciążającej na podstawie wyników pomiarów środowiskowych oraz dozimetrii indywidualnej i awaryjnej.*
- *Wyzwanie 2: Adaptacja radiochemicznych metod stosowanych do oznaczania wybranych nuklidów promieniotwórczych do pomiarów on-line w czasie normalnej pracy obiektu jądrowego.*
- *Wyzwanie 3: Modele biokinetyczne transportu nuklidów promieniotwórczych w organizmie człowieka umożliwiające zwiększenie precyzji oceny skutecznej dawki obciążającej.*
- *Wyzwanie 4: Badania epidemiologiczne, ekonomiczne oraz socjologiczne wpływu obiektu jądrowego na jego otoczenie.*

Perspektywa 2.3-4: Ochrona radiologiczna wokół akceleratorów.
Perspective 2.3-4: Radiological protection around accelerators.



Akceleracja cząstek naładowanych w zastosowaniach medycznych, przemysłowych i naukowych prowadzi do powstania silnego pola promieniowania pierwotnego i wtórnego, często o strukturze impulsowej. Szczególną uwagę zwracają wiązki o dużej intensywności typu FLASH oraz innowacyjne metody przyspieszania cząstek z wykorzystaniem laserów dużej mocy. Na promieniowanie rozproszone składa się promieniowanie gamma, neutrony i cząstki naładowane, o szerokim widmie energetycznym. Cząstki o wysokiej energii mogą aktywować elementy konstrukcyjne, a powstające nuklidy promieniotwórcze stanowią źródło ekspozycji nawet po wyłączeniu akceleratora. Dlatego zagadnienie ekspozycji na promieniowanie wtórne wokół akceleratorów wywołuje rosnące zainteresowanie badaczy.

- *Wyzwanie 1. Rozwój metod detekcji i dozimetrii promieniowania wokół akceleratorów pracujących w trybie impulsowym, z uwzględnieniem technologii FLASH i wiązek generowanych laserowo.*
- *Wyzwanie 2. Rozwój metod detekcji i spektrometrii promieniowania neutronowego umożliwiających rejestrację widma promieniowania neutronowego in-situ.*
- *Wyzwanie 3: Modelowanie procesów aktywacji oraz prognozowanie dawek promieniowania wtórnego dla pracowników oraz osób postronnych.*

2.4. Obszar „Środowisko”

Środowisko stanowi odrębny przedmiot ochrony radiologicznej. Poszczególne komponenty środowiska, a w szczególności przypadek biotop i biocenoza, podlegają ochronie niezależnie od istniejących związków z człowiekiem [9]. Rodzaj i zakres danych niezbędnych do przeprowadzenia analizy aktualnego stanu środowiska i ewentualnego wpływu promieniowania jonizującego obejmuje dane charakteryzujące przedmiot ochrony, procesy odpowiedzialne za migrację nuklidów promieniotwórczych oraz efekty, których należy oczekiwać na poziomie środowiska abiotycznego, pojedynczych organizmów, populacji czy wręcz ekosystemów. Badania podstawowe ograniczają się zazwyczaj do badania interakcji poszczególnych elementów środowiska z wybranymi nuklidami promieniotwórczymi w ramach tzw. radioekologii. Na bazie uzyskanych wyników zazwyczaj tworzone są modele matematyczne umożliwiające w pewnym zakresie uogólnienie zaobserwowanych zjawisk. Wyniki uzyskane metodą takich symulacji obarczone są bardzo dużą niepewnością wynikającą zazwyczaj ze zmienności symulowanej sytuacji, uproszczonego opisu przedmiotu badań lub zjawiska oraz wykorzystania uśrednionych (uogólnionych) parametrów i współczynników pozyskanych zwykle w ramach badania innego obiektu. Poza obiektami *stricte* związanymi z przemysłem jądrowym w kontekście środowiska istotne są zjawiska związane z występowaniem naturalnych nuklidów promieniotwórczych, w szczególności w sytuacji, kiedy ekspozycja na promieniowanie emitowane przez naturalne nuklidy promieniotwórcze jest zwiększona w rezultacie przypadkowej lub celowej działalności człowieka.

Perspektywa 2.4-1: Bezpieczne odpady jądrowe.
Perspective 2.4-1: Safe nuclear waste.



Długotrwałe przechowywanie wypalonego paliwa jądrowego i odpadów promieniotwórczych to jedno z najbardziej złożonych wyzwań współczesnej nauki i technologii jądrowej. Użyte materiały i struktury geologiczne powinny wytrzymać dziesiątki tysięcy lat bez korozji, pęknięć i utraty szczelności w warunkach ekspozycji na promieniowanie, wysokiego ciśnienia, temperatury i obecności wody. Wypalone paliwo generuje znaczne ilości ciepła i może zniszczyć bariery ochronne lub zmienić przepływ wód w skałach. W obecności wody mogą zachodzić reakcje chemiczne: rozpuszczanie paliwa oraz uwalnianie gazów. Ważne jest też realistyczne określenie celów przechowywania odpadów, gdyż obecne regulacje czasami wynikają z arbitralnie podejmowanych decyzji politycznych, przy braku wiarygodnych podstaw naukowych.

- *Wyzwanie 1: Analiza właściwości wypalonego paliwa jądrowego w kontekście możliwych interakcji ze środowiskiem w założonym miejscu docelowego/przejsściowego*

składowania oraz materiałami użytymi do budowy/konstrukcji składowiska.

- Wyzwanie 2: Badanie wpływu procesów biochemicznych i mikrobiologicznych na migrację izotopów w składowiskach odpadów promieniotwórczych.
- Wyzwanie 3: Tworzenie wiarygodnych, probabilistycznych modeli umożliwiających symulację i przewidywanie zmian funkcjonalności składowisk odpadów promieniotwórczych.

Perspektywa 2.4-2: Waloryzacja radiacyjna środowiska.
Perspective 2.4-2: Radiative valorisation of the environment.



Z perspektywy ochrony radiologicznej naturalne, a w pewnym zakresie także sztuczne nuklidy promieniotwórcze obecne w środowisku traktowane są w zasadzie jako element naturalnego tła promieniowania. Ekspozycja na warunki środowiskowe, interakcje z biosferą oraz wpływ celowej czy przypadkowej działalności człowieka powodują, że ich stężenie może się zmieniać w sposób charakterystyczny dla danego środowiska (naturalnego, środowiska przebywania człowieka, czy też środowiska pracy), tworząc typowe sygnatury zdeterminowane przede wszystkim sposobem wykorzystania terenu (ogólnie, zasobów naturalnych). Posiadanie szczegółowych danych w tym zakresie pozwala na interpretację wyników (albo stanowi warunki graniczne) w zasadzie dla wszystkich rodzajów monitoringu środowiska, niezależnie od założonego celu.

- Wyzwanie 1: Stworzenie bazy danych waloryzacji radiacyjnej środowiska z uwzględnieniem wpływu sposobu wykorzystania terenu/zasobów naturalnych w odniesieniu do sztucznych i naturalnych nuklidów promieniotwórczych (radonu).
- Wyzwanie 2: Badania stwarzające naukowe podstawy organizacji monitoringu środowiska, w szczególności obszarów o znacznej powierzchni i zmienności warunków atmosferycznych.
- Wyzwanie 3: Badanie procesów oraz metod w kierunku wzmocnienia odporności środowiska na zagrożenia radiacyjne.

Perspektywa 2.4-3: Migracja substancji promieniotwórczych w środowisku.
Perspective 2.4-3: Migration of radioactive substances in the environment.



Złożoność procesów transportu nuklidów promieniotwórczych w środowisku pozostaje głównym źródłem niepewności w przewidywaniu ich oddziaływania na biosferę. Emisja nuklidów promieniotwórczych do środowiska następuje zarówno w wyniku krótkotrwałych uwolnień, jak i w wyniku ich długotrwałej migracji z miejsca pierwotnej depozycji. Przy różnorodności ekosystemów, szybkim rozprzestrzenianiu skażeń w atmosferze, migracji w wo-

dach powierzchniowych i gruntowych oraz bioakumulacji na różnych poziomach organizacji ekosystemu niepewność oceny ryzyka radiologicznego na podstawie symulacji jest bardzo wysoka. Doświadczenia katastrofy w Czarnobylu pokazały, że skażenia opadem promieniotwórczym były złożoną funkcją warunków atmosferycznych, a w szczególności lokalnych opadów.

- Wyzwanie 1: Doskonalenie modeli o wysokiej rozdzielczości czasowej i przestrzennej do symulacji rozprzestrzeniania nuklidów promieniotwórczych w atmosferze i środowisku wodnym dla przewidywania zasięgu i skali skażeń, z uwzględnieniem nowego typu danych, w tym danych satelitarnych.
- Wyzwanie 2: Rozwój nowych metod modelowania procesów zachodzących w środowisku w oparciu o redukcjonizm eksperymentalny – bazy danych podstawowych parametrów dotyczących migracji nuklidów promieniotwórczych.
- Wyzwanie 3: Badania procesów długoterminowych, w skali dekad i stuleci, zmian w zachowaniu radionuklidów w środowisku.

Perspektywa 2.4-4: Zintegrowana ocena ryzyka dla promieniowania jonizującego i innych zagrożeń środowiskowych.
Perspective 2.4-4: Integrated risk assessment for ionising radiation and other environmental hazards.



Zintegrowana ocena ryzyka związanego z współwystępowaniem promieniowania jonizującego oraz innych zagrożeń fizycznych, jak również czynników toksycznych to jeden z najtrudniejszych tematów w toksykologii środowiskowej i radiobiologii. Zanieczyszczenia chemiczne mogą mieć działanie toksyczne, lecz integracja oceny zagrożenia dla różnych mechanizmów toksyczności, z uwzględnieniem promieniowania jonizującego, jest trudna zarówno na poziomie komórkowym, jak i dla organizmów wyższych. Wyniki badań przeprowadzonych bez uwzględnienia ewentualnej synergii/antagonizmu mogą prowadzić do niewłaściwych wniosków podejmowanych w oparciu o wymagania wyrażone zazwyczaj jako limit stężenia promieniotwórczego w danym komponencie środowiska. Istotne jest rozróżnienie między zanieczyszczeniem i skażeniem, zaś jego brak może skutkować błędną interpretacją wyników monitoringu. Dodatkowym problemem do rozwiązania jest ogólna tendencja stosowania odmiennego podejścia do antropogenicznych i naturalnych nuklidów promieniotwórczych w środowisku, kiedy łatwiej akceptuje się ekspozycje ze źródeł naturalnych.

- Wyzwanie 1: Integracja ochrony radiologicznej człowieka, flory i fauny oraz ekosystemów bazująca na założeniu „one health”.
- Wyzwanie 2: Interdyscyplinarne modele odpowiedzi biologicznej łączące działanie promieniowania jonizującego z toksykologią chemiczną.

- *Wyzwanie 3: Badania/analiza synergii/antagonizmu zanieczyszczeń promieniotwórczych i chemicznych z perspektywy postępowania z odpadami, klasyfikacji i rekultywacji terenów przemysłowych.*

3. Podsumowanie

Wiele organizacji na świecie, również tych działających w obszarze ochrony radiologicznej, podejmuje wysiłek przygotowania programów badawczych wytyczających plan działań na następne lata i dekady. Agendy te dotyczą całego spektrum tematów, począwszy od badań podstawowych, poprzez ich zastosowania i wdrożenia, aż do realizacji celów edukacyjnych i szkoleniowych. Programy badawcze europejskich platform w ochronie radiologicznej, takich jak EURADOS, MELODI, Radioecology ALLIANCE czy NERIS, stały się wytycznymi do formułowania tematyki badań na poziomie europejskim, m.in. w projekcie PIANOFORTE przygotowującym konkursy dla projektów realizowanych w ramach finansowania EURATOM.

W Polsce najważniejsze jednostki finansujące naukę to Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR), które wspiera badania naukowe, prace rozwojowe, komercjalizację wyników badań i wdrażanie innowacyjnych rozwiązań, oraz Narodowe Centrum Nauki (NCN) odpowiedzialne za finansowanie badań podstawowych bez nastawienia na bezpośrednie zastosowania komercyjne. NCBR zarządza strategicznymi programami badań naukowych i prac rozwojowych, zazwyczaj realizowanymi w ściśle określonym horyzoncie czasowym. Natomiast projekty NCN przyznawane są w ramach stosunkowo stabilnych czasowo 26 paneli, tematycznie pokrywających cały obszar badań naukowych w trzech głównych działach: Nauki Humanistyczne, Społeczne i o Sztuce; Nauki Ścisłe i Techniczne oraz Nauki o Życiu. Ze względu na interdyscyplinarny charakter badań, obejmujący nauki społeczne, ścisłe i nauki o życiu, utworzenie w NCN panelu dedykowanego ochronie radiologicznej stworzy możliwość rozwoju tej dziedziny nauki, rozwoju kadry i kompetencji. Zaprezentowana w tym dokumencie Strategiczna Agenda Badawcza może posłużyć jako wskazówka zarówno dla naukowców, jak i członków panelu w wyborze projektów o kluczowym znaczeniu dla przyszłości ochrony radiologicznej.

W 2035 roku planowane jest otwarcie pierwszej polskiej elektrowni jądrowej w pomorskiej gminie Choczewo. Strategiczna Agenda Badawcza powinna stworzyć podwa-

liny dla innowacyjnych badań, a także stać się inspiracją dla badaczy do podejmowania nowych projektów w obszarze ochrony radiologicznej w Polsce. Naukowy fundament ochrony radiologicznej stanowią badania podstawowe w zakresie fizyki, chemii, biologii i dziedzin pokrewnych. Bez nich nie byłoby możliwe ani skuteczne ograniczanie narażenia, ani rozwój nowoczesnych metod monitorowania, diagnostyki i prewencji skutków promieniowania. Badania te powinny dostarczać wiedzy o mechanizmach działania promieniowania, umożliwić zrozumienie ryzyka indukcji nowotworów i stanowić fundament dla weryfikacji i aktualizacji modeli będących podstawą całego systemu ochrony radiologicznej.

Literatura

1. W. Ruhm et al., *Visions for Radiation Dosimetry over the Next Two Decades – Strategic Research Agenda of the European Radiation Dosimetry EURADOS report* [2014-01], Braunschweig May 2014, ISBN 978-3-943701-06-7.
2. S. Bouffier, A. Auvinen, G. Baiocco, S. Candelas, E. Cardis, U., Galdieris, L. Lundholm, B. Maadas, S. Morel, S. Pazzaglia, R., Quinten's, M. Blattner, J.-M. Dolo, S. Haughtiest, *Strategic Research Agenda of the Multidisciplinary European Low Dose Initiative* (2022)
<https://melodi-online.eu/wp-content/uploads/2023/03/MELODI-SRA-2022-FINAL-post-consultation1.pdf>
3. A. Beson, S. Andrianopoulos, P. Corail, M. Montero Prieto, D. Oughton, W. Raskob, C. Turcanu and on behalf of the NERIS platform R&D committee *The NERIS roadmap: research challenges in emergency preparedness, response and recovery Radioprotection* 2023, 58(3), 169–180.
4. *Common strategic research agenda for radiation protection in medicine Insights Imaging* (2017) 8: 183–197.
5. The ALLIANCE Strategic Research Agenda (SRA)
<https://www.ceh.ac.uk/our-science/projects/radioecology-strategic-research-agenda>
6. *Strategic Research Agenda for the SHARE platform for social sciences and humanities research relating to ionizing radiation* (2020),
<https://www.ssh-share.eu/wp-content/uploads/2020/10/Revision-SH-SRA-After-consultationAugust2020-October-2020-FINAL.pdf>
7. J. Garnier-Laplace, G. Jean-Christophe, F. Mahaveer, F. Rauser, A. Wójcik, E. Sainsbury, S. Bouffier, M. Davydova, T. Kalita, and Ch. Hoeschen. *The vital role of radiation protection research in Europe's future: a PIANOFORTE white paper*. *Journal of Radiological Protection* 45, no. 2 (2025): 023001.
8. *Rola ochrony radiologicznej w Polsce wobec programu PPEJ*. Prezentacja raportu Polskiego Konsorcjum Ochrony Radiologicznej (PKOR) na sympozjum IFJ PAN „Ochrona Radiologiczna w Polsce wobec wyzwań Polskiego Programu Energetyki Jądrowej (PPEJ)”, Kraków, lipiec 2023 (niepubl.)
9. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4).