

# METODY POMIARU PROMIENIOWANIA I IDENTYFIKACJI NUKLIDÓW W ZDARZENIACH CBRN: ANALIZA BADAWCZA Z PROJEKTU EU-RADION

## *Methods for Radiation Measurements and Radionuclide Identification in CBRN Events: Insights from the EU-RADION Project Research*

Łukasz Szklarski, Alicja Jakubowska, Patryk Maik,  
Katarzyna Wołoszczuk, Anna Wieczorek, Paweł Krajewski

**Streszczenie:** Praca wyznacza implikacje zdarzeń radiologicznych w scenariuszach przemysłowych i terrorystycznych, wykorzystując wnioski z projektu EU-RADION i gruntownego przeglądu literatury. Wyniki podkreślają konieczność skutecznej ochrony przed promieniowaniem i środków reagowania w nagłych przypadkach, podkreślając kluczową rolę postępu technologicznego we wzmacnianiu zdolności wykrywania i zarządzania zagrożeniami radiologicznymi. Badanie podkreśla znaczenie trwających badań naukowych i międzynarodowej współpracy w umacnianiu globalnej odporności na zagrożenia radiologiczne.

**Abstract:** This study delineates the implications of radiological events in industrial and terroristic scenarios, utilizing insights from the EU-RADION project and a thorough review of existing literature. The findings highlight the necessity for robust radiation protection and emergency response measures, underlining the pivotal role of technological advancements in enhancing radiological threat detection and management capabilities. The study underscores the significance of ongoing research and international collaboration in bolstering global resilience against radiological hazards.

**Słowa kluczowe:** zagrożenia radiologiczne, przemysłowe incydenty radiologiczne, projekt EU-RADION, działania w sytuacjach awaryjnych, postęp technologiczny, międzynarodowa współpraca

**Keywords:** radiological threats, industrial radiological incidents, terroristic radiological attacks, EU-RADION project, radiation protection, emergency response, technological advancements, international collaboration

### 1. Wprowadzenie

Globalne bezpieczeństwo zmagają się z różnymi formami zagrożeń o różnych skalach. Wśród nich są zagrożenia chemiczne, biologiczne, radiologiczne i nuklearne (CBRN), reprezentujące kwartet potencjalnych niebezpieczeństw, zdolnych do zadania niezrównanej szkody ludności i ekosystemom. Klasyfikacja CBRN obejmuje różnorodne zagrożenia, od wycieków toksycznych substancji chemicznych i patogenów biologicznych po niekontrolowane uwalnianie materiałów radiologicznych i detonacje nuklearne. Historycznie te zagrożenia były głównie problemem dla państw posiadających ogromne zasoby i infrastrukturę. Jednak wraz z postępami technologicznymi narzędzia i wiedza do wykorzystania materiałów CBRN stają się coraz bardziej dostępne dla podmiotów pozapaństwowych, w tym grup ekstremistycznych.

Projekt EU-RADION powstaje, jako inicjatywa współpracy ośmiu europejskich instytucji, obejmujących

### 1. Introduction

The intricate tapestry of global security is persistently challenged by threats that manifest in various forms and scales. Among them, Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) threats loom large, representing a quartet of potent dangers with the capability to inflict unparalleled destruction on human populations and ecosystems. The CBRN classification encompasses a range of hazards, from toxic chemical spills and biological pathogens to the uncontrollable release of radiological materials and nuclear detonations. Historically, these threats were primarily a concern for state entities, with vast resources and infrastructure at their disposal. Yet, as technological advancements surge forward, the tools and knowledge to exploit CBRN materials have increasingly become accessible to non-state actors, including extremist groups and individuals with nefarious intentions.

obiekty badawcze, jednostki akademickie i organy rządowe, zjednoczone w dążeniu do opracowania przełomowego systemu detekcji i identyfikacji zagrożeń radiologicznych i nuklearnych (RN). Konsorcjum ma na celu zidentyfikowanie konkretnych luk w zdolnościach w ramach europejskich służb ratunkowych i praktyków CBRN, jak to zaznacza katalog ENCIRCLE i badanie IFAFRI. Głównym celem jest zwiększenie świadomości sytuacyjnej podczas misji przygotowania i reagowania, co przekłada się na podniesienie bezpieczeństwa i efektywności operatorów w sytuacjach awaryjnych. Projekt obejmuje szereg nowoczesnych narzędzi, w tym detektory promieniowania jonizującego, bezprzewodową sieć czujników, grupę bezzałogowych pojazdów naziemnych (UGV), modelowanie dyspersji, moduł dostosowujący położenie, algorytmy fuzji danych oraz system wsparcia decyzji. To połączenie zróżnicowanych technologii detekcji, różnorodnych zastosowań czujników i innowacyjnego oprogramowania pozycjonuje EU-RADION na granicy transformacji technologii detekcji zagrożeń CBRN, obiecując znaczący skok w zapewnianiu bezpieczeństwa i zwiększaniu efektywności operacyjnej służb ratunkowych.

W obecnej sytuacji geopolitycznej, wojna na Ukrainie rzuca światło na poważne zagrożenia związane z potencjalnymi wydarzeniami CBRN, zwłaszcza, gdy złożone konflikty splatają się z uprzemysłowionymi krajobrazami. Ukraina, ze swoim bogatym dziedzictwem osiągnięć przemysłowych i nuklearnych, jest symbolem narodu stawiającego czoło podwójnym wyzwaniom związanym z utrzymaniem integralności krytycznej infrastruktury i poruszaniem się po trudnych terenach wojennych. Kraj usiany jest licznymi potencjalnymi źródłami zagrożeń CBRN, począwszy od fabryk chemicznych [1] i obiektów badawczych po kluczowe instalacje nuklearne, takie jak Zaporoska Elektrownia Jądrowa. To zestawienie potencjalnych miejsc CBRN z gęsto zaludnionymi obszarami miejskimi powiększa skutki ewentualnych incydentów. Nawet pozornie drobne naruszenia lub zaniedbania w zakresie bezpieczeństwa mogą prowadzić do zdarzeń o poważnych konsekwencjach dla ludzi i środowiska.

Jednak Ukraina nie jest przypadkiem izolowanym; reprezentuje większy globalny paradygmat, gdzie państwa – rozwinięte i rozwijające się – borykają się z trudnościami zarządzania swoimi materiałami i infrastrukturą CBRN w kontekście ewoluujących zagrożeń. Wśród tych zagrożeń składnik 'R', czyli radiologiczny często wyróżnia się ze względu na swój trwały i powszechny wpływ. Zagrożenia radiologiczne, wynikające z niekontrolowanego uwalniania [2] materiałów promieniotwórczych, mają potencjał na wywołanie długofalowych szkód dla zdrowia ludzkiego i środowiska. W tym kontekście główne pytanie badawcze kierujące tym artykułem brzmi: „Jak nowoczesne technologie i badania, takie jak projekt EU-RADION, przyspieszają rozwój dziedziny detekcji promieniowania i identyfikacji radionuklidów

The EU-RADION project emerges as a collaborative initiative involving eight European institutions, spanning research facilities, academic entities, and governmental bodies, united in their endeavour to pioneer a groundbreaking system for Radiological, Nuclear (RN) threat detection and identification. The consortium is poised to address specific capability gaps identified within European first responder and CBRN practitioner realms, as highlighted in the ENCIRCLE catalogue and IFAFRI study. The overarching goal is to enhance situational awareness during preparedness and response missions, thereby elevating the safety and efficiency of emergency operators. The project encapsulates a myriad of cutting-edge tools encompassing Radiological and Nuclear (RN) sensors, a wireless sensor network, a swarm of Unmanned Ground Vehicles (UGVs), dispersion modelling, an adaptable positioning module, data fusion algorithms, and a decision support system. This blend of multifaceted detection technologies, diversified sensor applications, and innovative software positions EU-RADION at the cusp of transforming the CBRN threat detection landscape, promising a significant leap in ensuring the safety and augmenting the operational efficiency of emergency responders.

In the contemporary geopolitical theatre, the war in Ukraine serves as a poignant reminder of the acute risks associated with CBRN events especially when complex conflicts entangle with industrialized landscapes. Ukraine, with its rich legacy of industrial and nuclear advancements, is emblematic of a nation facing the dual challenges of maintaining the integrity of its critical infrastructure while navigating the harsh terrains of warfare. The nation is speckled with myriad potential CBRN sources, from chemical factories [1] and research facilities to critically important nuclear installations such as the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant. This juxtaposition of potential CBRN hotspots with dense urban locales multiplies the ramifications of possible incidents. Even seemingly minor breaches or lapses in security could cascade into events with significant human and environmental consequences.

However, Ukraine is not an isolated case; it represents a larger global paradigm where nations—developed and developing alike—grapple with the intricacies of managing their CBRN materials and infrastructure amidst a backdrop of evolving threats. Among these threats, the 'R' or radiological component often stands out due to its persistent and widespread impact. Radiological hazards, stemming from the uncontrolled release [2] of radioactive materials, have the potential to wreak long-term havoc on human health and the environment. With this context, the principal research question driving this paper is: “How are emerging technologies and research, such as

oraz jaki potencjał niosą w poprawie globalnej reakcji na zdarzenia CBRN?" Niniejszy artykuł skupia się głównie na aspektach radiologicznych CBRN, przedstawiając głębski wgląd w techniki, wyzwania i innowacje związane z detekcją promieniowania i identyfikacją radionuklidów w różnych scenariuszach.

## 2. Metodologia

Metodologia zastosowana w tym artykule jest podzielona na dwa główne kanały zbierania i analizy danych, mające na celu zapewnienie wszechstronnego zrozumienia aspektów radiologicznych incydentów CBRN oraz postępu technologicznego w mechanizmach reagowania. Pierwszy z nich zakorzeniony jest w bezpośrednich doświadczeniach i wynikach zgromadzonych przez autorów w ramach projektu EU-RADION. Ten projekt, cechujący się innowacyjnymi krokami w detekcji promieniowania i identyfikacji radioizotopów, stanowi źródło danych empirycznych i analiz badawczych. Obejmuje on testy terenowe, laboratoryjną weryfikację urządzeń oraz aplikacje opracowanych technologii w czasie rzeczywistym, dostarczając pragmatycznego spojrzenia na zdolności i potencjalne ulepszenia w metodach detekcji promieniowania. Drugi kanał obejmuje wyczerpujący przegląd literatury akademickiej, obejmujący szeroką gamę artykułów, raportów i białych ksiąg dotyczących zagrożeń radiologicznych, technologii detekcji oraz procedur służb ratunkowych. To naukowe badanie ma na celu umieszczenie wyników empirycznych z projektu EU-RADION w kontekście szerszego dyskursu zarówno akademickiego, jak i praktycznego, tym samym wspierając wielowymiarowe zrozumienie omawianego tematu. Zbieg bezpośrednich spostrzeżeń opartych na projekcie z wnikliwym przeglądem literatury akademickiej stanowi podstawę metodycznie solidnego badania, które ma na celu przełamanie luki między teoretycznymi postulatami a praktycznymi wymogami w zakresie wykrywania i zarządzania zagrożeniami radiologicznymi we współczesnym środowisku. Dzięki temu podwójnemu podejściu metodologicznemu artykuł stara się dostarczyć zróżnicowanej i kompleksowej analizy wyzwań i rozwiązań związanych z wykrywaniem i zarządzaniem zagrożeniami radiologicznymi.

## 3. Wyniki

### 3.1. Różne typy zdarzeń radiologicznych i ich skutki

Zdarzenia radiologiczne obejmują szereg incydentów, w których substancje promieniotwórcze są przypadkowo uwalniane lub celowo wykorzystywane, co może prowadzić do potencjalnej szkody dla ludzi i środowiska. Te zdarzenia można ogólnie podzielić na przemysłowe i terrorystyczne, z każdym z nich wiążą się unikatowe implikacje i konsekwencje. Charakter i skala tych

those from the EURADION project, advancing the field of radiation detection and radionuclide identification, and what potential do they hold in enhancing the global response to CBRN events?" This paper narrows its focus predominantly on the radiological aspects of CBRN, presenting a deep dive into the techniques, challenges, and innovations surrounding radiation detection and the identification of radionuclides in varied scenarios.

## 2. Methodology

The methodology employed in this article is bifurcated into two primary channels of data collection and analysis, serving to provide a comprehensive understanding of the radiological aspects of CBRN incidents and the technological advancements in response mechanisms. The first channel is rooted in the direct experiences and findings amassed by the authors from the EU-RADION project. This project, marked by its innovative strides in radiation detection and radionuclide identification, serves as a firsthand source of empirical data and insights. It encompasses field tests, device verifications, and real-time applications of developed technologies, furnishing a pragmatic perspective on the capabilities and potential improvements in radiation detection methodologies. The second channel entails an exhaustive review of academic literature, encapsulating a wide array of peer-reviewed articles, reports, and white papers pertinent to radiological threats, detection technologies, and first responder protocols. This scholarly investigation serves to contextualize the empirical findings from the EU-RADION project within the broader academic and practical discourse, thereby fostering a multidimensional understanding of the subject matter. The confluence of firsthand project-based insights with a rigorous academic literature review underpins a methodologically robust inquiry, which aims to bridge the gap between theoretical postulations and practical exigencies in addressing radiological hazards in the contemporary milieu. Through this dual-pronged methodological approach, the article endeavours to contribute a nuanced and well-rounded examination of the challenges and solutions inherent in radiological threat detection and management.

## 3. Results

### 3.1. Different types of radiological events and their consequences

Radiological events encompass a range of incidents where radioactive materials are unintentionally released or maliciously deployed, leading to potential

zdarzeń wymagają głębokiego zrozumienia związanych z nimi zagrożeń radiologicznych, głównie niebezpieczeństw związanych z promieniowaniem gamma, o których mowa była wcześniej. Ta sekcja wyjaśnia różne typy zdarzeń radiologicznych, skupiając się na scenariuszach przemysłowych i terrorystycznych, aby dostarczyć kompleksowego zrozumienia potencjalnego ryzyka i skutków, jakie mogą wywołać.

#### a. Przemysłowe

Przemysłowe zdarzenia radiologiczne obejmują głównie incydenty w instalacjach nuklearnych, zakładach produkcyjnych lub w dowolnej branży wykorzystującej substancje promieniotwórcze. Niezamierzone narażenie na promieniowanie gamma w takich miejscach może prowadzić do poważnych konsekwencji dla zdrowia i środowiska. Na przykład przypadkowe uwolnienie substancji promieniotwórczych może skażić otoczenie, stanowiąc długoterminowe zagrożenie zarówno dla ludzi, jak i ekosystemu [3]. Gęste, ciężkie materiały, takie jak ołów czy beton, zazwyczaj stosowane do osłony przed promieniowaniem gamma, mogą nie zapewnić wystarczającej ochrony w przypadku znacznego uwalniania promieniowania. Jak opisano wcześniej, oddziaływanie promieniowania gamma na organizmy biologiczne może wywołać szereg szkodliwych skutków, w tym zespół popromienny przy wysokich poziomach ekspozycji [2]. Ponadto, przewlekłe narażenie, nawet przy niższych dawkach, może wywoływać mutagenезę, potencjalnie prowadząc do rozwoju nowotworów [4]. Zapewnienie solidnych protokołów bezpieczeństwa przemysłowego i systemów monitorowania promieniowania jest kluczowe w ograniczaniu ryzyka związanego z przemysłowymi zdarzeniami radiologicznymi.

#### b. Terrorystyczne

Atak terrorystyczny z wykorzystaniem zagrożeń radiologicznych, taki jak użycie „brudnej bomby” lub ataki na instalacje nuklearne, stanowi złowieszcze połączenie złowrogiej intencji z zagrożeniami radiologicznymi. W odróżnieniu od terroryzmu konwencjonalnego, terroryzm radiologiczny ma na celu wywołanie powszechnej paniki, długoterminowych skutków zdrowotnych i trwałego zanieczyszczenia środowiska. Promieniowanie gamma, ze względu na swoją penetracyjną moc, stanowi główne zagrożenie w takich scenariuszach. Natychmiastowe skutki terrorystycznego zdarzenia radiologicznego mogą objawiać się zespołem popromiennym wśród dotkniętej populacji, równoległe z szybkim wystąpieniem paniki i zakłóceniem społecznym [5]. W dłuższej perspektywie, pozostałe promieniowanie, głównie pochodzące z opadów, może wywołać szereg problemów zdrowotnych, w tym nowotwory, obok degradacji ekosystemu. Historyczne okrucieństwa w Hiroszimie i Nagasaki ilustrują katastroficzny potencjał terroryzmu radiologicznego, [6] podkreślając konieczność wzmocnienia

harm to humans and the environment. These events can be broadly categorized into industrial and terroristic, each with unique implications and consequences. The nature and magnitude of these events necessitate a deep understanding of the radiological hazards involved, primarily the dangers posed by gamma radiation as previously discussed. This section elucidates on the distinct types of radiological events, focusing on industrial and terroristic scenarios, to provide a comprehensive understanding of the potential risks and the cascading effects they may engender.

#### a. Industrial

Industrial radiological events primarily encompass incidents within nuclear facilities, manufacturing plants, or any industry utilizing radioactive materials. The inadvertent exposure to gamma radiation in such settings can lead to grave health and environmental consequences. For instance, the accidental release of radioactive substances can contaminate the surroundings, posing a long-term risk to both humans and the ecosystem [3]. The dense, heavy materials like lead or concrete, typically used for shielding against gamma radiation, may fail to provide adequate protection in the event of substantial radiological emissions. As detailed in prior sections, gamma radiation's interaction with biological entities can induce a spectrum of detrimental effects, including acute radiation syndrome at high exposure levels [2]. Moreover, chronic exposure, even at lower doses, can catalyze mutagenesis, potentially leading to cancerous developments [4]. Ensuring robust industrial safety protocols and radiation monitoring systems are paramount in mitigating the risks associated with industrial radiological events.

#### b. Terroristic

Radiological terroristic acts, such as the deployment of “dirty bombs” or assaults on nuclear facilities, embody a sinister fusion of malevolent intent with radiological hazards. Unlike conventional terrorism, radiological terrorism aims to instigate widespread panic, long-term health repercussions, and persistent environmental contamination. Gamma radiation, given its penetrative potency, is a principal concern in such scenarios. The immediate aftermath of a terroristic radiological event may manifest in acute radiation syndrome among the affected populace, paralleled by a swift onset of panic and societal disruption [5]. In the longer run, the residual radiation, primarily from fallout, can engender a host of health issues including cancer, alongside ecological degradation. The historical atrocities of Hiroshima and Nagasaki epitomize the cataclysmic potential of radiological terrorism, [6] underscoring

środków bezpieczeństwa radiologicznego, szybkiej reakcji awaryjnej i edukacji publicznej na temat zagrożeń radiologicznych [7]. W synchronizacji z tymi wysiłkami, rozwijanie międzynarodowej współpracy i wymiany informacji jest kluczowe w zapobieganiu materializacji zagrożeń terroryzmu radiologicznego.

### **c. Skazanie gruntu i powietrza: rodzaje radionuklidów oraz metody pomiaru**

Zdarzenia powodujące rozproszenie radionuklidów w powietrzu oraz ich depozycję na powierzchni, mogą być wynikiem działań zarówno zamierzonych jak i przypadkowych oraz mieścić się w skali począwszy od dużych awarii instalacji jądrowych lub użycia broni nuklearnej po zdarzenia radiacyjne o małej skali jak zastosowanie w złych zamiarach urządzenia rozpraszającego substancje promieniotwórcze do otoczenia z zastosowaniem materiałów wybuchowych lub innymi metodami czy awarii w trakcie transportu materiałów promieniotwórczych.

Obecnie, główna obawa organów rządowych odpowiedzialnych za bezpieczeństwo kraju, skupiona jest na zdarzeniu radiacyjnym polegającym na celowym rozproszeniu substancji promieniotwórczej w obszarze miejskim. Pojawia się problem oceny narażenia radiacyjnego zarówno dla personelu grup ratowniczych jak i dla mieszkańców znajdujących się w obrębie skażonej miejskiej zabudowy, czyli trudność oceny pojawiających się mocy dawek promieniowania oraz dawki skumulowanej otrzymywanej przez człowieka. Wymaga to prowadzenia prognozy zmian stężenia radionuklidów oraz mocy dawki w funkcji położenia i czasu, identyfikacji dróg narażenia ludzi o najwyższym stopniu ryzyka oraz analizy skuteczności zastosowania różnych wariantów środków zaradczych czy naprawczych poprzez na podstawie prognozy redukcji stężenia radionuklidów, mocy dawek oraz dawek skumulowanych [8].

Skutecznym narzędziem wspomagającym planowanie i osiągnięcie odpowiedniego stopnia gotowości do odpowiedzi w wypadku sytuacji nadzwyczajnej są krótko i średnio zasięgowe modele dyspersji atmosferycznej.

W przypadku pojawienia się skażenia radiacyjnego w środowisku miejskim, w procesie wydawania decyzji odnośnie działań nakierowanych na minimalizację długoterminowych skutków radiologicznych, wyżej wymienione modele mogą ułatwić porównanie oraz ocenę skuteczności różnych wariantów strategii prowadzenia akcji naprawczych i działań zapobiegawczych (działanie mające na celu ochronę razem z akcją naprawczą) dostarczając prognozy redukcji dawek od ekspozycji zewnętrznej oraz dawek droga oddechową [9].

Główne wymagania odnośnie komputerowych modeli dyspersji wskazują na ważność dopasowania modelu do uwarunkowań środowiskowych. W szczególności aby osiągnąć zdolność wygenerowania przez model prawidłowej prognozy adekwatnej do stopnia zagro-

the imperative for fortified radiological security measures, prompt emergency response, and public education on radiological hazards [7]. In synchrony with these efforts, fostering international cooperation and intelligence sharing is crucial in precluding the materialization of radiological terroristic threats.

### **c. Ground contamination and air contamination: types of radionuclides, and methods of measurements**

Events that can result in the dispersal or deposition of radionuclides include both intentional and unintentional events, and can range from major events involving a nuclear facility or a nuclear weapon, to the events of smaller scale, such as malevolent use of dispersion devices with or without an explosion or transportation accident.

Currently, the main concern of many governmental authorities is the deliberate dispersal of radioactive substances in an urban areas. To quantify the radiological hazard both for first responders as well as for inhabitants of urban contaminated areas, the radiation dose rates and cumulative doses to human must be evaluated. This requires the prediction of changes in radionuclide concentrations or radiation dose rates as a function of location and time, the identification of the most important pathways for human exposure, and the prediction of the reduction in radionuclide concentrations, radiation dose rates or radiation doses resulting from various countermeasures or remediation efforts [8].

Atmospheric dispersion models, used in the short range and mid-range scenarios, can be valuable tools for planning appropriate emergency preparedness and response actions. The models used in the 'countermeasures' actions can facilitate comparison of the relative effectiveness of various remediation strategies and countermeasures (protective actions, including remedial actions) in terms of the reduction in external and inhalation doses at the decision making process for addressing long term radiological concerns after an urban contamination event has occurred [9].

A general recommendation indicate that it is very important that the models chosen are appropriate for the assessment conditions for which they are to be used. Particularly, that approaches and predictive capabilities of models for assessing the significance of a given contamination event should cover a wide range of scenarios i.e.: included 3D geometry of urban building complexity and take in to account phenomena and processes associated with numerous radionuclides of different behaviour in atmosphere as well as when deposited on the ground which radionuclides (depending of their amount of activity) are considered as very dangerous and dangerous,

żenia spowodowanego zdarzeniem skażenia radiacyjnego, należy wykonać prognozy na możliwie licznym zbiorze scenariuszy, m.in.: uwzględniających geometrię 3D skomplikowanej zabudowy miejskiej oraz wziąć pod uwagę zjawiska i procesy fizyko-chemiczne towarzyszące licznym radionuklidom, które charakteryzują się różnym zachowaniem w powietrzu atmosferycznym oraz po depozycji na powierzchni gruntu. W zależności od aktywności źródła promieniotwórczego, radionuklidy są klasyfikowane jako bardzo groźne lub groźne, czyli zdolne z dużym prawdopodobieństwem wywoływać trwałe uszkodzenia ciała u osób mających kontakt ze źródłem w czasie dłuższym niż parę minut. Do takich radionuklidów należą: kobalt Co-60, pluton Pu-238, cez Cs-137, stront Sr-90, iryd Ir-192, selen Se-75, iterb Yb-169, Tul Tm-170, californ Cf-252 lub źródła neutronów Am/Be, Pu/Be [10], [11].

W literaturze poświęconej komputerowym modelom środowiska, podkreśla się często, że prognozy modeli są zawsze obciążone znaczącym zakresem niepewności, z powodu luki jaka powstaje między złożoną rzeczywistością zjawisk zachodzących w środowisku a koniecznymi uproszczeniami w opisie matematycznym tych zjawisk stosowanym w modelach.

Dlatego, poprawę w wiarygodności prognoz modelowych można osiągnąć poprzez analizę danych wyjściowych różnych modeli przy tych samych danych wyjściowych scenariusza testowego. Preferowaną formą walidacji modeli jest porównywanie ich przewidywań z rzeczywistymi danymi pomiarowymi, które to dane gromadzi się w trakcie pomiarów prowadzonych w warunkach rutynowych bądź awaryjnych uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska [12].

Odwrotne podejście, zastosowane w projekcie EU-RADION polega na zbieraniu informacji w czasie rzeczywistym o zdarzeniu, w tym danych o depozycji, przez grupę bezzałogowych pojazdów naziemnych (UGV) wspomaganych przez zespół ratowników wyposażony w detektory przenośne. W efekcie powstają mapy zagrożenia radiologicznego oraz wyznaczana jest potencjalna ekspozycja w funkcji wielkości, kierunku oraz odległości od źródła. Dane wyjściowe systemu obliczeniowego dyspersji (dispersion engine) tzn. mapa zagrożeń i estymata źródła są obrazowane w tzw. Taktycznym Narzędziu Dowodzenia (zob. rozdział 3.4), które tworzy obraz operacyjny wspomagający decyzję.

Zaawansowane modelowanie dyspersji, które „działa” w złożonej geometrii przestrzennej, uwzględnia swoje właściwości cząstek takich jak ich gęstość, rozmiary, wpływ sił elektrostatycznych, znacznie poszerza zdolności do symulacji depozycji w odniesieniu do obecnie stosowanych standardowych rozwiązań. Zastosowanie sprzężonych modeli dyspersyjnych oraz metod uporządkowania zbioru w połączeniu z metodami selekcji parametrów, nie było do tej pory stosowane w modelach metodach dyspersyjnych, na przykład Nieobciążo-

that is would be likely to cause permanent injury to a person who handled it, or were otherwise in contact with it, for more than a few minutes. for instance: cobalt Co-60, plutonium Pu-238, caesium Cs-137, strontium Sr-90, iridium Ir-192, selenium Se-75, ytterbium Yb-169, thulium Tm-170, californium Cf-252 and neutron sources Am/Be, Pu/Be [10][11].

The model predictions are always burden by significant range of uncertainty due to a gap between complex environmental reality and perforce occurred processes simplification. Therefore, improvements in the reliability of model predictions can often be achieved by comparing model predictions with each other using artificial testing scenarios. The preferred way of validating the models is to compare their predictions with real environmental data, that is, results obtained from measurements made after normal or accidental releases to the environment [12].

Reverse approach, applied in the EURADION project is to collect deposition data by swarm of UGVs and person-worn in the area in order to generate a threat map as well as estimate the potential source/direction of the hazard. The measurements will be updated in real-time. The output of the dispersion engine, i.e. threat map and estimated source, will be visualized in Tactical Command tool which will create an operational picture for the command. Dispersion modelling that can handle complex geometry together with the properties that are inherent in the particles, such as density, spatial dimensions as well as static forces will enhance the ability to do well-resolved deposition simulations beyond the standard modelling tools used today. This will lead to a better source estimation by application of adjoint dispersion models and the method of regularization, with adaptation of parameter selection methods not yet used in these type of applications, e.g. Unbiased Predictive Risk Estimation, Generalized Cross Validation and Discrepancy Principle [13].

#### d. Lost radioactive sources

Lost radioactive source incidents are mostly associated with industrial accidents rather than terrorist attacks. However, it is worth mentioning in this article because first responders are dispatched to search for lost radioactive sources in case in case the source owner fails.

In most cases, the potential threat is on a smaller scale, but it can still pose a serious threat to people in the vicinity. Usually, it is the result of insufficiently trained personnel and has occurred during non-destructive testing. Lost radioactive source incidents are related mainly to sealed gamma sources. The most popular are Co-60, Ir-192, Cs-137, Tm-170. The gamma radiation of these isotopes differs in energy,

na Metoda Oceny Ryzyka (ang. Unbiased Predictive Risk Estimation), Uogólniona Metoda Walidacji Krzyżowej (ang. Generalized Cross Validation) i Zasada Rozbieżności (ang. Discrepancy Principle) prowadzi do dokładniejszego oszacowania wielkości i położenia źródła promieniotwórczego [13].

#### d. Zagubione zamknięte źródła promieniotwórcze

Incydenty związane z zagubionymi źródłami promieniotwórczymi najczęściej są związane z przemysłem, nie atakami terrorystycznymi. Jednak warto o nich wspomnieć w artykule, ponieważ jeśli zawiodą działania podjęte przez właściciela źródła, w następnej kolejności wysyłane są służby pierwszego reagowania.

W większości przypadków zagubione źródła promieniotwórcze stanowią zagrożenie na mniejszą skalę, ale wciąż mogą stanowić poważne niebezpieczeństwo dla ludności znajdującej się w okolicy. Zazwyczaj takie incydenty wynikają z błędów w szkoleniu personelu, a zdarzają się podczas wykonywania badań nieniszczących lub transportu. Najczęściej są wykorzystywane zamknięte źródła promieniowania gamma takie, jak: Co-60, Ir-192, Cs-137, Tm-170. Promieniowanie gamma tych izotopów różni się energią, co pozwala na ich stosowanie do badania materiałów o różnej grubości.

Znane są przypadki, gdzie:

- zamknięte źródła promieniotwórcze zostały skradzione, noszone blisko ciała, np. w kieszeni, i pozostawione w miejscu, gdzie stanowiły zagrożenie dla zdrowia ludzi,
- zamknięte źródła promieniotwórcze zostały utracone podczas transportu,
- zamknięte źródła promieniotwórcze zostały zagubione podczas pracy, np. podczas badań geologicznych.

Incydenty związane z zagubionymi zamkniętymi źródłami promieniotwórczymi obecnie zdarzają się rzadziej, niż chociażby 20 lat temu, z powodu zwiększonego stosowania generatorów neutronów lub przenośnego sprzętu rentgenowskiego. Ten rodzaj sprzętu jest o wiele bezpieczniejszy, ponieważ po odłączeniu urządzenia od zasilania nie występuje ryzyko ekspozycji. Niemniej jednak, urządzenia z zamkniętym źródłem promieniotwórczym są wciąż dostępne, a transport źródeł promieniotwórczych jest powszechny. Z tego powodu nie powinno się ignorować ryzyka związanego z utratą źródła promieniotwórczego. Należy przygotować oraz wspierać służby pierwszego reagowania nową technologią w przypadku takiego zdarzenia.

### 3.2. Procedury służb ratunkowych

W przypadku zdarzenia radiologicznego, niezależnie od jego źródła, głównym obowiązkiem Służb Ratunkowych (SR), takich jak strażacy, ratownicy medyczni i specjalistyczne zespoły ds. substancji niebezpiecznych, jest stosowanie rygorystycznie opracowanych procedur

allowing these sources to be used to screen materials of different thicknesses, depending on the energy.

There are known cases where:

- radioactive sources have been stolen, carried close to the body, e.g. in a pocket, and left in a place where they expose people,
- radioactive sources have been lost during the transport,
- radioactive sources have been lost during the work, e.g. in geological research.

Lost sources are less common accidents nowadays because of the increased use of neutron generators or portable X-ray equipment. This type of equipment is much safer from this point of view because there's no exposure after switching off. However, closed source devices are still available and transport of sources is common. Therefore, we should consider the risk of losing the source and prepare and support first responders with new technology in case of such an event.

### 3.2. First responder procedures

In the case of a radiological event, regardless of its origin, the main responsibility of First Responders (FRs), such as firefighters, paramedics, and specialized hazmat teams, is to adhere to rigorously structured procedures designed to ensure the safeguarding of both potential victims and their own well-being. These procedures are of utmost importance in reducing the effects of radiological incidents [14][15]. On a general level, the procedures address following steps of action for the FRs.

As they approach the incident site, FRs are advised to move upwind and uphill to minimize potential exposure to hazardous radiological materials and contaminants. They must also remain vigilant for any fumes or smokes that may indicate the presence of hazardous agents. Upon reaching the site, the FRs need to establish a secure perimeter. This perimeter acts as the point for the Incident Command (IC), becoming the central hub of operations, while concurrently serving to prevent unauthorized access to the affected area. From this vantage point, a comprehensive visual assessment of the site is conducted, aimed at locating victims, identifying hazardous properties, ascertaining the presence of spills, leaks, and fires.

Ensuring the safety of response personnel is a concern of utmost importance. This involves the meticulous execution of a risk assessment and hazard identification process. Potential hazards, such as the risk of fire, electrical hazards, and explosions, are methodically scrutinized. Throughout the course of the response actions, continuous monitoring of conditions that could engender hazardous situations is imperative.

mających na celu zapewnienie ochrony potencjalnych ofiar oraz własnego bezpieczeństwa. Procedury te mają najwyższe znaczenie w ograniczaniu skutków zdarzeń radiologicznych [14][15]. Ogólne procedury obejmują następujące kroki działań dla SR.

W miarę zbliżania się do miejsca zdarzenia przez SR, zalecane jest poruszanie się pod wiatr i w górę, aby zminimalizować potencjalne narażenie na niebezpieczne substancje radiologiczne i zanieczyszczenia. Muszą także być czujni na ewentualne opary lub dymy, które mogą wskazywać na obecność niebezpiecznych substancji. Po dotarciu na miejsce, Służby Ratunkowe muszą utworzyć bezpieczny obwód. Ten obwód staje się Punktem Dowodzenia (PD), stając się centralnym punktem operacji, jednocześnie służąc do zapobiegania nieupoważnionemu dostępowi do dotkniętego obszaru. Z tego punktu obserwacyjnego przeprowadzana jest kompleksowa wizualna ocena miejsca, mająca na celu zlokalizowanie ofiar, zidentyfikowanie niebezpiecznych właściwości, ustalenie obecności wycieków, przecieków i pożarów.

Zapewnienie bezpieczeństwa personelu reagującego to sprawa najwyższej wagi. Obejmuje to skrupulatne przeprowadzenie oceny ryzyka i identyfikacji zagrożeń. Potencjalne zagrożenia, takie jak ryzyko pożaru, niebezpieczeństwa elektryczne i eksplozje, są metodycznie analizowane. Przez cały czas trwania działań reagowania, ciągle monitorowanie warunków, które mogą wywołać sytuacje niebezpieczne, jest niezwykle istotne.

Aby kompleksowo zająć się aspektem radiologicznym zdarzenia, SR muszą szybko uzyskać odczyty z przyrządów do pomiaru promieniowania. Te przyrządy są kluczowymi narzędziami do kwantyfikowania poziomów promieniowania i zlokalizowania obszarów zanieczyszczonych. W odpowiedzi na te odczyty, SR odgradzają obszary zanieczyszczone i zakładają strefy dekontaminacji i triażu. Zasadą jest minimalizacja narażenia personelu reagującego na promieniowanie w sposób możliwie jak najściślejszy. Wymaga to utrzymania bezpiecznej odległości od źródeł promieniowania oraz okresowej rotacji personelu na podstawie odczytów poziomu promieniowania.

Utrzymywanie otwartych linii komunikacji jest również kluczowe. SR muszą natychmiast powiadomić personel spoza miejsca zdarzenia, w tym właściwe władze i specjalistyczne zespoły reagowania na sytuacje awaryjne związane z radiologicznymi zagrożeniami, aby zapewnić skoordynowaną i efektywną reakcję. Skuteczna komunikacja ułatwia koordynację zasobów i rozpoznawanie istotnych informacji.

Choć procedury są ogólnie standaryzowane, pozostają utrzymujące się trudności. Badania podkreślają niewystarczającą wiedzę wśród Służb Ratunkowych na temat narażenia na promieniowanie i środków zapobiegawczych, często z powodu minimalnego lub całkowitego braku szkolenia w zakresie zdarzeń radiologicznych, które mają miejsce niezwykle rzadko [16].

To comprehensively address the radiological aspect of the incident, FRs must swiftly obtain readings from radiation detection instruments. These instruments serve as critical tools for quantifying radiation levels and pinpointing contaminated areas. In response to these readings, FRs cordon off the contaminated zones and establish decontamination and triage areas. The cardinal principle is to minimize radiation exposure to response personnel as stringently as reasonably possible. This necessitates maintaining a safe distance from radiation sources, and the periodic rotation of personnel based on radiation level readings.

Maintaining open lines of communication is also pivotal. FRs must promptly notify off-site personnel, including relevant authorities and specialized radiological emergency response teams, to ensure a coordinated and efficient response. Effective communication facilitates the coordination of resources and the dissemination of vital information.

Although procedures are generally standardized, there remain persistent challenges. Research highlights the insufficient knowledge among first responders regarding radiation exposure and preventive measures, often due to minimal or nonexistent training in radiological incidents, which are extremely rare [16].

Consequently, equipment developers must confront challenges that extend beyond the technical realm. They must also navigate the intricacies of adapting to differing procedures across various regions, some of which may not be practically implemented by first responders due to their lack of proper training.

### 3.3. Requirements for equipment

There are two key aspects to the investigation of the radiological component of CBRN events: exposure assessment and its identification. Dosimeters are used to determine the presence of radiation and measure quantities such as dose and dose rate. Meanwhile, spectrometry is used to identify the source and energetic characteristics of radiation. The detailed requirements for these two types of equipment are outlined below.

#### 3.3.1. Dosimeters

Different types of dosimeters are available, with Geiger-Muller (GM) counters being the most widely used in radiation protection. Although they are the oldest radiation detectors, their continued use is attributed to their simplicity, cost-effectiveness, and ease of use [17]. Other detectors such as proportional counters, ionization chambers, and scintillators exist but they tend to be more complex to operate, more susceptible to damage, or larger in size. Therefore,



W rezultacie producenci sprzętu muszą stawić czoło wyzwaniom wykraczającym poza obszar techniczny. Muszą także radzić sobie z zawiłościami dostosowywania procedur do różnych regionów, z których niektóre mogą nie być praktycznie wdrażane przez pierwszych reagujących z powodu braku właściwego przeszkolenia.

### 3.3. Wymagania dotyczące wyposażenia

Badanie części radiologicznej zdarzeń CBRN obejmuje dwie kluczowe kwestie: ocenę narażenia oraz identyfikację emitera. Dozymetry promieniowania jonizującego służą do określenia obecności promieniowania oraz pomiaru wielkości takich jak dawka i moc dawki. Spektrometria natomiast służy do identyfikacji źródła oraz oceny jego aktywności.

#### 3.3.1. Dozymetry

Dostępne są różne typy dozymetrów. Najczęściej spotykane w ochronie radiologicznej są liczniki Geigera-Müllera (GM). Ich popularność wynika z ich prostoty, dobrego stosunku ceny do jakości i łatwości użycia [17]. Istnieją również inne detektory, takie jak liczniki proporcjonalne, komory jonizacyjne i scyntylatory, ale zazwyczaj są one bardziej skomplikowane w obsłudze, mniej odporne na uszkodzenia lub mające większe rozmiary. Dlatego właśnie liczniki GM są bardziej praktyczne, zwłaszcza w sytuacjach kryzysowych. Aby skutecznie badać potencjalne zagrożenia radiologiczne, detektory muszą spełniać określone kryteria. Podstawowy krok stanowi ocena zakresu pomiarowego. Dla zdarzeń CBRN konieczny jest szeroki zakres pomiarowy - nawet do wartości 0,5 Sv/h, z preferencją dla pomiarów w przestrzennym równoważniku dawki. Zakres operacyjny urządzenia musi obejmować wartości krytyczne, takie jak 100  $\mu$ Sv/h, definiujące strefę gorącą (z ang. "hot zone"). Jest to obszar, na którym nałożona jest konieczność zachowania ostrożności w celu uniknięcia nadmiernej ekspozycji lub skażeń promieniotwórczych ludzi z ogółu ludności oraz służb ratunkowych. Inna istotna wartość to, 100 mSv/h określająca obszar wewnątrz strefy gorącej, gdzie powinny być podejmowane jedynie działania ratujące życie, a czas pobytu powinien być ograniczony, w zależności od zmierzonego poziomu promieniowania [18]. Kluczowym kryterium jest liniowa odpowiedź urządzenia w całym zakresie działania. Ponadto urządzenie musi być dobrane zgodnie z energią mierzonego promieniowania jonizującego. Większość emiterów gamma emituje fotony o energii od 30 keV do 2 MeV. Detektory promieniowania wykazują zależność kątową - odczyt odbiega od rzeczywistej wartości w zależności od orientacji systemu detekcji względem pozycji źródła, ze względu na ich konstrukcję, rozmiar fizyczny i energię padającego promieniowania. Urządzenia używane do wykrywania promieniowania powinny charakteryzować się jak najbardziej zbliżoną odpowiedzią kątową. Równie

GM tubes are therefore more practical, particularly in crisis situations. To effectively investigate potential radiological threats, these detectors must meet specific criteria. Assessing the measurement range is a critical first step. For CBRN events, a wide range up to 0.5 Sv/h is essential, with a preference for rate dose equivalent measurements. The device's operating range must cover critical values, such as 100  $\mu$ Sv/h, defining the "hot zone." This zone surrounds dangerous radioactive sources, mandating precautions to shield responders and the public from potential external exposure and contamination. Another crucial value is 100 mSv/h, designating an area within the "hot zone" where only life-saving actions should be executed, with a restricted stay time of 30 minutes or less, depending on the measured radiation level [18]. A key criterion is the device's linear response (dose rate), across its entire operational range. In addition, the instrument must be selected according to the energy of the measured ionizing radiation typically between 30 keV and 2 MeV for most gamma-emitting radionuclides. Radiation detectors usually exhibit directional dependence, the reading of the detection system does deviate from the real value depending on the orientation of the detection system relative to the position of the source due to their constructional details, physical size, and the energy of the incident radiation. Instruments used for detecting radiation emitters should have a well-defined and as uniform as possible angular response. Equally important is the response time of the device, as every second is critical in emergencies.

#### 3.3.2 Spectrometers

Gamma spectrometers are specialized instruments used to measure and analyze gamma rays emitted by various radioactive materials. Photons, each with unique and distinct energies, upon interacting with the spectrometer, create a spectrum akin to a fingerprint of a radionuclide. Analyzing this spectrum enables the identification and quantification of radionuclides.

To measure the energy of photons, the instrument must be equipped with a gamma-ray spectrometer, such as a scintillation or semiconductor detector. The choice between these two types depends on the desired outcome: high resolution or high efficiency. Scintillators are often used to detect and quantify low-level radioactive sources, while semiconductor detectors offer superior energy resolution.

The energy range handled by the spectrometer typically spans from 30 keV to 2 MeV. A Multi-Channel Analyzer (MCA) connected to each spectrometer assigns photons to channels and generates a histogram. The scale of the histogram depends on the number of channels. Calibration is crucial for associating energy values with specific detector channels. A higher number of channels provides

istotny jest czas reakcji urządzenia, gdyż w sytuacjach awaryjnych każda sekunda jest istotna.

### 3.3.2. Spektrometry

Spektrometry gamma są specjalistycznymi narzędziami używanymi do pomiaru i analizy promieniowania gamma emitowanego przez różne materiały promieniotwórcze. Każdy emiter emituje fotony o określonej energii/energiach, a one oddziałując ze spektrometrem, tworzą widmo, które jest jak odcisk palca danego izotopu promieniotwórczego. Analiza tego widma umożliwi identyfikację izotopów promieniotwórczych. Aby zmierzyć energię fotonów, instrument musi być wyposażony w spektrometr gamma, taki jak detektor scyntylacyjny lub półprzewodnikowy. Wybór między tymi dwoma typami zależy od pożądanego rezultatu: wysokiej rozdzielczości lub wysokiej efektywności. Scyntylatory są często używane do wykrywania i kwantyfikacji źródeł promieniotwórczych o niskiej energii, podczas gdy detektory półprzewodnikowe oferują lepszą rozdzielczość energetyczną. Zakres energetyczny obsługiwany przez spektrometr zazwyczaj obejmuje od 30 keV do 2 MeV. Analizator wielokanałowy (Multi Channel Analyser – MCA) podłączony do każdego spektrometru przypisuje fotony do kanałów i generuje histogram. Skala histogramu zależy od liczby kanałów. Kalibracja jest kluczowa dla powiązania wartości energetycznych z określonymi kanałami detektora. Większa liczba kanałów zapewnia lepszą rozdzielczość energetyczną, ułatwiając odróżnienie blisko położonych szczytów, nawet gdy są one blisko siebie. Optymalnie jednostki MCA mają 2048 kanałów i są powszechnie preferowane w spektrometrii gamma dla efektywnej analizy danych. Jednakże, choć wyższa liczba kanałów zapewnia zwiększoną precyzję, idzie to w parze z wyższymi kosztami. Dla stałych i dokładnych pomiarów, utrzymanie stabilnych warunków temperatury jest istotne. Identyfikacja izotopów promieniotwórczych opiera się na wzorcach widm, wgranych w bibliotekę oprogramowania spektrometru. Zaawansowane spektrometry umożliwiają jednoczesną identyfikację wielu nuklidów. Jednak takie systemy zazwyczaj są droższe.

### 3.4. Nowatorskie rozwiązania opracowane w projekcie EU-RADION

W projekcie EU-RADION skupiono się na opracowaniu innowacyjnych i przełomowych rozwiązań technologicznych dostosowanych do potrzeb i oczekiwań użytkowników końcowych, zidentyfikowanych w katalogu ENCRICLE dotyczącym braków technologicznych. Proponowane podejście skupia się na tworzeniu jednego, interoperacyjnego systemu, zachowując jednocześnie niezależność i modularność składników. Każdy składnik systemu został zaprojektowany jako w pełni funkcjonalna „czarna skrzynka” z dobrze zdefiniowanymi i otwartymi

finer energy resolution, facilitating the distinction of closely positioned peaks, even when they are in close proximity. Optimally, MCA units with 2048 channels are commonly preferred in gamma spectrometry for efficient data analysis. However, while higher channel counts offer increased precision, they also come at a higher cost. For consistent and accurate measurements, maintaining stable temperature conditions is essential. Identification of radionuclides relies on observed spectral patterns, often supported by an integrated library within the spectrometer software. Advanced spectrometers enable the simultaneous identification of multiple nuclides. However, these systems tend to be more expensive

### 3.4. Novel solutions developed at EURADION project

In the context of the EU-RADION project, the focus has been put on the development of innovative and groundbreaking technological solutions tailored to the needs and expectations of end-users as identified in the ENCRICLE catalogue of technological gaps. The proposed approach centralizes on creating a single, interoperable system while maintaining component independence and modularity. Each system subcomponent has been designed as a fully functional “black box” with well-defined and open interfaces. Collectively, these individual components offer expanded capabilities, providing enhanced situational awareness for the end-user. The resultant system seamlessly integrates state-of-the-art detection technology with pioneering algorithms and modern hardware & software design, thus significantly advancing the capabilities for radiation detection, identification, and monitoring.

One of the pivotal components within the EU-RADION system is the Sensor Integration Unit (SIU), the primary project product. It combines several technologies into a single piece of hardware, serving as an integral part of the EU-RADION Network of Sensors. The SIU is designed to be compatible and deployable in stationary, hand-held, and mobile (Unmanned Ground Vehicle mounted) sensing platforms, each capable of fulfilling distinct roles within the holistic Network of Sensors.

Considering the individual technologies and functionalities of the SIU, each EU-RADION SIU is equipped with a Geiger-Muller tube, a gamma spectrometer, an EU-RADION navigation/positioning module, and a hydrogen gas sensor. The device is supported by communication electronics, internal data storage, and a processing platform to acquire spectrometer data. Additionally, the hand-held variant is equipped with a non-proprietary energy source (the other variants rely on standardized

mi interfejsami. Wspólnie te poszczególne komponenty oferują rozszerzone możliwości, zapewniając użytkownikowi końcowemu większą świadomość sytuacyjną. Wynikowy system bezproblemowo integruje najnowocześniejszą technologię detekcji z pionierskimi algorytmami oraz nowoczesnymi projektami sprzętu i oprogramowania, znacząco podnosząc zdolności do detekcji, identyfikacji i monitorowania promieniowania.

Jednym z kluczowych składników w systemie EU-RADION jest Jednostka Integracji Czujników (ang. Sensor Integration Unit – SIU), główny produkt projektu. Łączy ona kilka technologii w jednym urządzeniu, będąc integralną częścią Sieci Czujników EU-RADION. SIU została zaprojektowana do kompatybilności i możliwości wdrożenia na stacjonarnych, przenośnych oraz mobilnych (zamontowanych na Bezałogowym Pojeździe Lądowym – ang. Unmanned Ground Vehicle – UGV), platformach pomiarowych, z każdą zdolną do spełnienia odrębnych ról w Sieci Czujników.

Biorąc pod uwagę poszczególne technologie i funkcjonalności, każda SIU EU-RADION jest wyposażona w licznik Geigera-Mullera, spektrometr gamma, moduł nawigacyjny/pozycjonujący EU-RADION oraz czujnik wodoru. Urządzenie wspierane jest przez moduły komunikacyjne, wewnętrzną pamięć danych i platformę przetwarzania do akwizycji danych ze spektrometru. Dodatkowo, wersja przenośna jest wyposażona w nieopatentowane źródło energii (inne wersje korzystają ze standaryzowanych zewnętrznych źródeł zasilania). Ten projekt urządzenia zapewnia, że każda jednostka jest zdolna nie tylko do wykrywania zagrożeń promieniotwórczych, ale także dostarcza kompaktowe i precyzyjne dane do systemu operatora, a mianowicie Taktycznego Narzędzia Dowodzenia (ang. Tactical Command Tool – TCT) EU-RADION. Moduł nawigacyjny EU-RADION, jako kluczowy komponent, łączy w sobie jednostkę nawigacji inercyjnej, moduł GPS oraz zintegrowane algorytmy filtrujące, umożliwiając precyzyjną nawigację, wyrównując wszystkie pomiary w czasie i pozycji.

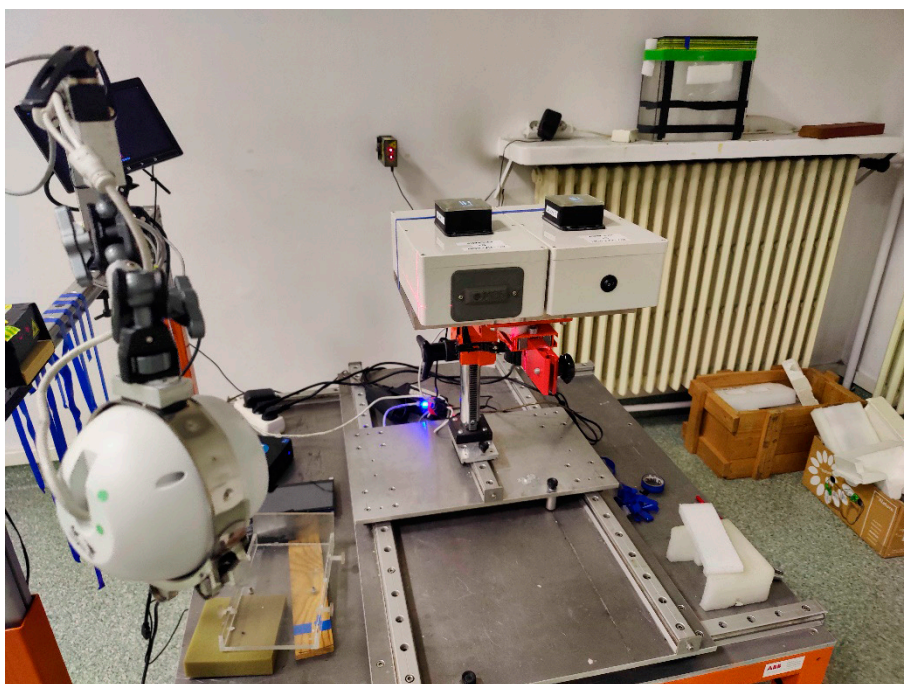
W trakcie projektu przeprowadzono wiele testów z użyciem SIU, w tym kilka wariantów urządzeń w procesie weryfikacji. Rozważano i zintegrowano jako prototypy różne spektrometry, takie jak KROMEK GR1 i Hamamatsu C12137. Przeprowadzono kompleksowe pomiary itera-

external power sources). This design ensures that each unit is not only capable of detecting radiation threats but also provides compact, precise, and geo-localised data to the operator system, namely the EU-RADION Tactical Command Tool. The EU-RADION navigation module, a critical component, combines inertial navigation unit, GPS module, and integrated filtering algorithms to enable precise navigation, aligning all measurements in time and position.

Throughout the project, multiple tests were conducted with the SIUs, including several device variants in the verification process. Various spectrometers, such as KROMEK GR1 and Hamamatsu C12137, were considered and integrated into the prototypes. Comprehensive measurements were conducted iteratively at the Central Laboratory for Radiological Protection (CLOR). A sample laboratory setup can be seen in the Photo 1.

The project witnessed three major iterations of prototypes, each enhancing the SIU's functionalities. The final iteration of the hand-held device and the mobile SIU integrated on the UGV platform can be observed in the Photo 2. While a stationary SIU can be seen in the Photo 3.

In an operational scenario, the developed Sensor Integration Units (SIUs) are intended to function as a cohesive Network of Sensors. Thanks to the supporting equipment and dedicated EU-RADION software, these individual devices are interconnected. The communication system is implemented using a mesh network with specialized Wi-Fi antennas. The Wi-Fi network's range can be easily expanded with



**Fot. 1.** Testy laboratoryjne SIU – porównanie spektrometrów (fot. CLOR)  
**Photo 1.** SIU Laboratory Setup – Comparison of Spectrometers (photo CLOR)

cyjnie w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR). Przykładowa konfiguracja laboratoryjna została przedstawiona na fot. 1.

W trakcie projektu założono trzy główne iteracje prototypów. Każda z nich miała na celu ulepszenie funkcjonalności SIU. Ostateczna iteracja urządzenia przenośnego oraz mobilnej jednostki SIU zintegrowanej na platformie UGV można zobaczyć na fot. 2. Natomiast stacjonarna jednostka SIU widoczna jest na fot. 3.

W operacyjnym scenariuszu, opracowane SIU mają działać jako spójna Sieć Czujników. Dzięki wsparciu sprzętowemu oraz dedykowanemu oprogramowaniu EU-RADION, te poszczególne urządzenia są ze sobą połączone. System komunikacyjny jest implementowany przy użyciu sieci typu „mesh” z wyspecjalizowanymi antenami Wi-Fi. Zasięg sieci Wi-Fi można łatwo rozszerzyć dzięki zdolności UGV do wdrożenia dodatkowych zasilanych akumulatorami punktów „mesh”. Wszystkie platformy pomiarowe oraz powiązany sprzęt są zarządzane przez dedykowaną aplikację, znaną jako Kontroler Sieci Czujników EU-RADION (ang. Network Controller – NC). NC pełni rolę warstwy pośredniej, łączącej składniki sieciowe w terenie z warstwą systemową skoncentrowaną na przetwarzaniu i analizie danych. Dodatkowo, NC monitoruje status wszystkich aktywów sieciowych, utrzymuje operacje systemowe i wysyła powiadomienia o ewentualnych usterkach w systemie. Ponadto, przewidziano integrację algorytmów przetwarzania danych na poziomie NC. Obecnie w NC znajdują się algorytmy kalibracji energetycznej spektrum gamma oraz prototypowe algorytmy identyfikacji radionuklidów. To rozwiązanie z dedykowaną aplikacją do zarządzania siecią oferuje innowacyjne podejście do utrzymania sprawności sieci czujników, upraszczając proces wdrażania systemu. Aplikacja obejmuje również podstawowy interfejs graficzny do zarządzania pomiarami oraz ułatwiania procesu znajdowania usterek w zintegrowanych urządzeniach. Przykładowy widok z interfejsu oraz wynik pomiaru można zobaczyć na rys. 1.

Finalna wersja systemu jest przyjazna dla użytkownika, a wszystkie kompatybilne komponenty, takie jak SIU, są automatycznie konfigurowalne. System można łatwo rozbudować, dodając dodatkowe jednostki czujnikowe i dostosować do różnych scenariuszy dzięki integracji z różnymi platformami. Wszystkie wymienione wcześniej komponenty sieci czujników oraz rozwiązanie komunikacyjne zostały zaimplementowane przy użyciu najnowszych bibliotek i technologii, głównie opartych na koncepcji Internetu Rzeczy oraz najnowszych postępów technologicznych [19].

Oprócz Sieci Czujników, w projekcie rozważono dedykowany system świadomości sytuacyjnej. Przygotowano kilka narzędzi do przetwarzania i analizy danych. Po pierwsze, komponent nazwany Silnikiem Dyspersji (ang. Dispersion Engine – DE) to specjalistyczne oprogramowanie dedykowane do szacowania skali zagro-



**Fot. 2.** Bezzałogowy pojazd ze zintegrowaną SIU (fot. CLOR)  
**Photo 2.** EU-RADION UGV with integrated SIU (photo CLOR)



**Fot. 3.** Prototyp stacjonarnej SIU dostarczony przez Airsense Analytics (fot. CLOR)  
**Photo 3.** Stationary SIU prototype provided by Airsense Analytics (photo CLOR)

the UGV's capability to deploy additional battery-powered mesh points. All sensing platforms and associated equipment are managed by a dedicated application, known as the EU-RADION Network of Sensors Controller (NC). The NC acts as a middleware layer, bridging the in-the-field network components and the system layer focused on data processing and analysis. Additionally, the NC monitors the status of all network assets, maintains system operations, and sends notifications of potential system faults. Furthermore, the integration of data processing algorithms has been foreseen at the NC level. Currently, the NC includes gamma spectrum energy calibration and prototype radionuclide identification algorithms. This solution with a dedicated application for network management offers an innovative approach to keeping the network of sensors operational while simplifying the system deployment process. The application also includes basic graphical user interface for requesting sensor measurements and facilitating the integrated devices debugging process. Sample view from the interface and measurement result can be seen in the Figure 1.

zeń. Pobiera ono dane z czujników i wykorzystuje algorytmy modelowania w przód i wstecz, aby oszacować źródło zagrożenia i przewidzieć jego zasięg (algorytm Prognozowania Zagrożeń – ang. Hazard Prediction). Obliczenia te są wspierane przez modele dyspersji i dane pogodowe w czasie rzeczywistym. Po drugie, opracowano dedykowaną aplikację o nazwie Kontroler Roju (SC), odpowiedzialną za sterowanie i monitorowanie Bezzałogowych Pojazdów Lądowych (UGV). Obecnie narzędzie oferuje trzy plany misji: szacowanie strefy bezpiecznej, skanowanie obszaru i monitorowanie obszaru. Szacowanie strefy bezpiecznej to początkowy krok w koncepcji pełnej autonomii działania UGV, skupiający się na identyfikacji potencjalnych dróg ewakuacyjnych i określeniu „strefy bezpiecznej” dla działań służb ratunkowych. Drugi krok obejmuje skanowanie obszaru przy jednoczesnym dokonywaniu pomiarów dawki w celu oceny zagrożenia na obszarze i dostarczenia kompleksowych danych do Silnika Dyspersji z wielu punktów pomiarowych. Ostatnim etapem operacyjnym jest ciągłe monitorowanie wybranych obszarów pod kątem zmian, włączając w to pomiary spektrometru. Opracowane rozwiązania zostały zainspirowane najnowszymi pracami nad mapowaniem promieniowania oraz teorią planowania trasy dla pojazdów autonomicznych [20].

Jako główne narzędzie dostępu z perspektywy użytkownika końcowego, Taktyczne Narzędzie Dowodzenia (TCT) jest dostarczane jako integralna część systemu EU-RADION. To narzędzie oferuje nie tylko wizualizację danych, ale także pełną kontrolę nad jednostkami czujnikowymi oraz zintegrowanymi narzędziami obliczeniowymi. Opracowane oprogramowanie podąża za wcześniej zdefiniowanymi wymaganiami użytkownika i agreguje wszystkie otrzymane dane w jedną przestrzeń informacyjną dla wszystkich użytkowników. Jednym z najważniejszych aspektów projektowania interfejsu użytkownika końcowego jest redukcja potencjalnego przeciążenia informacjami. W projekcie skupiono się szczególnie na tym zagadnieniu, ponieważ przeciążenie może wywołać dodatkowy stres i negatywnie wpłynąć na proces podejmowania decyzji [21].

Modularny i czarno-skrzynkowy projekt komponentów systemu EU-RADION pozwala na rozszerzalną i interoperacyjną architekturę. Wspomniane narzędzia i rozwiązania mogą być używane oddzielnie do konkretnych



Rys. 1. Podstawowy Interfejs Graficzny Kontrolera Sieci

Fig. 1. Network Controller Basic Graphical Interface (fig. CLOR)

The resulting system is user-friendly, with all compatible components, such as SIUs, being auto configurable. The system can be easily expanded by adding additional sensing units and adapted for various scenarios due to its integration with a variety of platforms. All of the aforementioned network of sensors components and communication solution were implemented using the most recent libraries and technologies mostly based on The Internet of Things concept and the most recent advances [19].

Apart from the Network of Sensors, a dedicated situational awareness system has been considered in the project. Several data processing and analysis tools have been considered. First and foremost, the Dispersion Engine Tool is specialized software dedicated to threat estimation. It acquires data from the sensing devices and employs forward and backward modelling algorithms to estimate the source of the threat and predict its range (Hazard Prediction algorithm). These calculations are supported by dispersion models and real-time weather data inputs. Secondly, a dedicated application called the Swarm Controller has been developed, responsible for controlling and monitoring UGV units. At present, the tool offers three mission plans: safe zone estimation, area scan, and area monitoring. The safe zone estimation is the initial step in the concept of fully autonomous UGV operation, focusing on identifying potential evacuation routes and defining a “safe zone” for first responders’ operations. The second step involves scanning the area while conducting dose rate measurements to evaluate the threat over the area and provide comprehensive data to the Dispersion Engine from multiple measuring points. The final operational step is continuous monitoring of selected areas for changes, including spectrometer measurements. The

scenariuszy. Jednak główną zaletą i innowacją systemu jest połączenie tych komponentów. Na przykład, Kontroler Roju i Silnik Dyspersji mogą współpracować, gdzie Kontroler Roju otrzymuje informacje zwrotną od Silnika Dyspersji w celu usprawnienia procesu modelowania i wiarygodności danych. Ponadto, poprzez segregację warstw „w terenie” i systemowej, możliwe jest zoptymalizowanie wdrażania komponentów, wymagań dotyczących mocy obliczeniowej oraz przepustowości sieci. Czasochłonne i złożone przetwarzanie może być wykonywane za pomocą rozwiązań w chmurze, podczas gdy przetwarzanie na poziomie czujnika i podstawowa filtracja danych może zmniejszyć ilość przesyłanych danych. Potencjalne funkcjonalności, które można włączyć do systemu EU-RADION, wykraczają poza obecne osiągnięcia, z trwającymi planami ciągłego doskonalenia systemu w przyszłości.

#### 4. Podsumowanie

Główne pytanie tej analizy skupiało się na zrozumieniu wieloaspektowych zagrożeń związanych z wydarzeniami radiologicznymi oraz ocenie skuteczności nowatorskich technologii w łagodzeniu tych zagrożeń, jak to ilustruje projekt EU-RADION. Wyniki przedstawione w poprzednich sekcjach wyjaśniają szeroki zakres zagrożeń radiologicznych, które mogą wynikać zarówno z wydarzeń przemysłowych, jak i terrorystycznych.

Analiza zdarzeń radiologicznych o charakterze przemysłowym ujawniła poważne konsekwencje, takie jak rozległe uszkodzenia komórkowe i potencjalne długoterminowe problemy zdrowotne, co podkreśla konieczność stosowania skutecznych środków ochrony przed promieniowaniem. Z drugiej strony, analiza zdarzeń radiologicznych o charakterze terrorystycznym podkreśliła pilną potrzebę zwiększenia środków zabezpieczeń oraz systemów reagowania w sytuacjach awaryjnych, aby przeciwdziałać potencjalnym katastrofalnym skutkom.

Integracja doświadczalnych spostrzeżeń z projektu EU-RADION, w połączeniu z kompleksowym przeglądem i użyciem literatury akademickiej, wzbogaciła zrozumienie obecnego krajobrazu zagrożeń radiologicznych. Projekt EU-RADION stanowi doskonały przykład potencjału postępu technologicznego we wzmacnianiu zdolności wykrywania i monitorowania zagrożeń radiologicznych, co jest kluczowe dla szybkiej reakcji i rozwiązywania tych zagrożeń.

Wyjaśnienie istotnych aspektów dotyczących zagrożeń radiologicznych podkreśla konieczność prowadzenia badań, innowacji technologicznych oraz międzynarodowej współpracy. Synteza wyników tej analizy nie tylko przyczynia się do rosnącej wiedzy w tej dziedzinie, ale także napędza dyskusję na temat radzenia sobie z zagrożeniami radiologicznymi.

Należy podkreślić znaczenie rozwoju i integrowania innowacyjnych rozwiązań, takich jak te proponowane

developed solutions have been inspired by the most recent work on radiation mapping and theory behind path planning for autonomous vehicles [20].

Finally, as the main access point from the end-user perspective, the Tactical Command Tool is provided as an integral part of the EU-RADION system. This tool offers not only data visualization but also full control of the sensing units and integrated calculation tools. The developed software follows the predefined user requirements and aggregates all received data into a single information space for all users. One of the most important aspects of designing end-user interface is to reduce potential information overload. A particular focus has been put within the project on that topic, as the overload can induce additional stress and can negatively impact decision-making process [21].

The modular and black-box design of the EU-RADION system components allows for an extendable and interoperable architecture. The mentioned tools and solutions can be used separately for specific scenarios. However, the system's main advantage and innovation lie in the combination of these components. For instance, the Swarm Controller and Dispersion Engine can collaborate, with the Swarm Controller receiving feedback from the Dispersion Engine to enhance the modelling process and data reliability. Moreover, by segregating the in-the-field and system layers, it is possible to optimize component deployment, processing power requirements, as well as network throughput. Time-consuming and complex processing can be performed with cloud-based solutions, while sensor-level processing and basic data filtration can reduce the amount of data transferred. The potential functionalities that can be incorporated into the EU-RADION system extend beyond the current achievements, with ongoing plans for continuous system improvement in the future.

#### 4. Conclusions

The primary inquiry of this investigation revolved around understanding the multifaceted risks associated with radiological events, and assessing the efficacy of emerging technologies in mitigating these threats, as illustrated by the EU-RADION project. The findings delineated in the preceding sections elucidate the broad spectrum of radiological hazards that may arise from both industrial and terroristic origins.

The discourse on industrial radiological events revealed the dire consequences such as extensive cellular damage and potential long-term health issues, emphasizing the necessity for robust radiation protection measures. On the other hand, the analysis of terroristic radiological events highlighted the urgency for enhanced security measures and

w projekcie EU-RADION. To dzięki takim przedsięwzięciom globalna społeczność może dążyć do budowania odpornego i bezpiecznego środowiska w obliczu ewoluujących zagrożeń radiologicznych oraz innych zagrożeń CBRN. Dalsze badania i inicjatywy współpracy są niezbędne do doskonalenia istniejących strategii i badania nowych możliwości w celu zwiększenia globalnej gotowości i reakcji na zagrożenia radiologiczne.

*Łukasz Szklarski, Patryk Maik, Anna Wieczorek,  
ITTI sp. z o.o.  
Poznań*

*Alicja Jakubowska,  
Katarzyna Wołoszczuk, Paweł Krajewski,  
Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej /  
Central Laboratory for Radiological Protection,  
Warsaw, Poland*

emergency response systems to thwart the potential catastrophic impacts.

The integration of experiential insights from the EU-RADION project, coupled with a comprehensive review of academic literature, has enriched the understanding of the current radiological threat landscape. The EU-RADION project epitomizes the potential of technological advancements in augmenting radiological detection and monitoring capabilities, which is crucial in timely response and management of radiological hazards.

In retrospect, the elucidation of critical aspects concerning radiological threats underscores the imperative of ongoing research, technological innovation, and international collaboration. The synthesis of findings in this study not only contributes to the burgeoning body of knowledge in this domain but also propels the discourse on radiological hazard management forward.

The significance of developing and integrating innovative solutions such as those manifested in the EU-RADION project cannot be overstated. It is through such endeavours that the global community can aspire to foster a resilient and secure environment against the backdrop of evolving radiological and other CBRN threats. Further research and collaborative initiatives are essential in refining the existing strategies and exploring novel avenues for enhancing the global readiness and response to radiological hazards.

#### Literature:

- [1] Szklarski, L. (2023). CBRN Threats To Ukraine During The Russian Aggression: Mitigating Chemical Hazards During Wartime – Countermeasures And Decontamination Strategies For Ukraine In Light Of Potential Chemical Facility Destruction; ZN SGSP 2023; 87 : 165-180; DOI: 10.5604/01.3001.0053.9116
- [2] Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2012). Radiobiology for the Radiologist (7th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- [3] Cember, H., & Johnson, T. E. (2008). Introduction to Health Physics (4th ed.). McGraw-Hill.
- [4] Cardis, E., Krewski, D., Boniol, M., Drozdovitch, V., Darby, S., Gilbert, E., . . . Vrijheid, M. (2006). Estimates of the cancer burden in Europe from radioactive fallout from the Chernobyl accident. *International Journal of Cancer*, 119(6), 1224-1235.
- [5] Glasstone, S., & Dolan, P. J. (1977). *The Effects of Nuclear Weapons*. United States Department of Defense.
- [6] Szklarski, L. (2023). CRN Threats To Ukraine During The Russian Aggression: Mitigating Gamma Radiation Hazards-Innovative Countermeasures And Decontamination Strategies In The Context Of Potential Destruction Of The Zaporizhzhia Nuclear Power Plant; ZN SGSP 2023; 87 : 143-164; DOI: 10.5604/01.3001.0053.9115
- [7] Oughterson, A. W., & Warren, S. (1956). *Medical effects of the atomic bomb in Japan*. McGraw-Hill.
- [8] International Atomic Energy Agency (2012). *Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003-2007)*, IAEA-TECDOC-1678.
- [9] K.M. Thiessen, K.G. Andersson, V. Berkovskyy, et al. (2011). *Assessing emergency situations and their aftermath in urban areas: The EMRAS II Urban Areas Working Group, Radioprotection*, vol. 46, n°6, S601-S607.
- [10] International Atomic Energy Agency (2005). *IAEA Safety Guide No. RS-G-1.9 "Categorization of Radioactive Sources"*.
- [11] IAEA TECDOC 1344 (2003). "Categorization of radioactive sources".
- [12] International Atomic Energy Agency (2021). *Assessment of Radioactive Contamination in Urban Areas*, IAEA-TECDOC-1941 .
- [13] N. Brännström, L. Å Persson (2016). *Source reconstruction using a bilevel optimization method with a smooth weighted distance function*, *Atmospheric and Oceanic Physics*.
- [14] NATO Civil Emergency Planning Civil Protection Group (2014). *Guidelines for first responders to a CBRN incident*.

**Lukasz Szklarski, PhD**, has been deeply involved in the development of technological security solutions for the European Commission (EC) and European Defence Agency (EDA). Holding an MSc in Computer Science and a PhD in Security, his primary area of expertise lies in CBRN detection systems. Currently, he leads the CBRN department at ITTI and maintains the role of coordinator for the EU-SENSE, EU-RADION, and CHIMERA projects. (Łukasz Szklarski ORCID 0000-0001-6779-5897)

**Alicja Jakubowska** received her Master's degree in medical physics from the Faculty of Physics at the University of Warsaw. Since February 2020, she has been working at the Central Laboratory for Radiation Protection, and two years later she was appointed technical manager at the Laboratory for Calibration of Dosimetric and Radon Instruments. Participation in projects in the CBRN and metrology field, such as EURADION, CHIMERA, metroRadon, traceRadon.

**Patryk Maik** has received Master's degree in the field of Control Engineering and Robotics at Poznań University of Technology. Since March 2016, he has been involved in R&D projects such as: PROTECT, iBorderCtrl, FOLDOUT, CENSIT, EU-SENSE. His areas of technical expertise lies in: sensor systems, software development and engineering, machine learning, data fusion, optimisation algorithms, system architecture design. Currently he leads software development team at CBRN department at ITTI and holds the role of technology manager for EU-RADION and CHIMERA projects.

**Katarzyna Woloszczuk**, PhD, Head of Department of Dose Monitoring and Calibration in CLOR. Over 15 years' experience in standardization of radiation detection monitors and radon metrology. Participation in projects in the CBRN and metrology field, such as EURADION, CHIMERA, metroRadon, traceRadon.

**Anna Wieczorek** has received a Master's degree in 2008 in the field of psychology. For the next 10 years she was working as a researcher in the field of neuroscience, with special interest in electrophysiology. She was awarded with two research grants for young scientists and co-authored 5 book chapters and 3 research papers listed on JCR. She was a board member and co-creator of online science-based games aiming at stimulating memory and attention. Since 2023 she has been involved in R&D projects in CBRN Department of ITTI (EU-RADION, CHIMERA).

**Paweł Krajewski**, PhD, currently director of Central Laboratory for Radiological Protection (since 2006). His main field of work is validation of hazard prediction models in a case of routine and emergency releases of radionuclides to the environment. Coordinator of numerous national and international projects. In 2019 nominated for 5 years cadence as a member of the Group of Experts referred to in Article 31 of the Euratom Treaty, in 2019 appointed by The General Directorate for Environmental Protection as a member of The National Commission for Environmental Impact Assessment. Polish representative in the Committee of Radiological Protection and Public Health (CRPPH) at Nuclear Energy Agency (NEA).