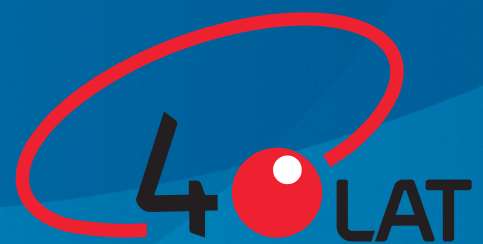


e-ISSN 2353-9062  
ISSN 0867-4752

2 (124) 2022

# BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA



Państwowej Agencji  
Atomistyki

1982-2022

**Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:**

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

Wydawca: **Państwowa Agencja Atomistyki**  
ul. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa

Redakcja: **Elżbieta ZALEWSKA**  
**Apolonia CICHOCKA**  
ul. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa  
TEL. 22 628 94 39  
FAX 22 621 37 86  
E-MAIL [biuletyn@paa.gov.pl](mailto:biuletyn@paa.gov.pl)  
www. [gov.pl/web/paa](http://gov.pl/web/paa)

#### **Rada Programowa**

prof. dr hab. **Janusz JANECZEK** – przewodniczący Rady  
prof. dr hab. inż. **Andrzej CHMIELEWSKI** – członek Rady  
prof. dr hab. n. med. **Marek K. JANIĄK** – członek Rady  
prof. dr hab. n. med. **Eugeniusz DZIUK** – członek Rady  
dr hab. **Agnieszka KORGUL** – członek Rady  
dr **Tomasz NOWACKI** – członek Rady

**Maciej JURKOWSKI**, Redaktor naczelny

**Marek WOŹNIAK**, Redaktor techniczny

e-ISSN 2353-9062  
ISSN 0867-4752

Druk: „PAKULSKI” Adam Pakulski

# BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

---

BIULETYN INFORMACYJNY PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI

Nr 2 (124) 2022  
Warszawa

## Spis treści

Szymon Suchcicki	
Deterministyczne analizy bezpieczeństwa elektrowni jądrowych z wykorzystaniem sprzężonych obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych . . . . .	5
Zuzanna Podgórska	
Aktualne przepisy dotyczące ochrony przed narażeniem na radon w Polsce . . . . .	12
Andrzej Kasza, Paweł Król	
Wydobycie i poszukiwania rud uranu w Górach Świętokrzyskich. Przyczynek do oceny stanu zagrożenia środowiska . . . . .	17
Marek Niemczyk	
Awaria elektrowni jądrowej w Czarnobylu w dniu 26 kwietnia 1986 r. . . . .	23
Wojciech Głuszewski, Maria Kubicka	
Nowe kierunki rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce . . . . .	36

## Szanowni Państwo

Bieżący numer Biuletynu otwiera artykuł nawiązujący do obowiązków i zadań Państwowej Agencji Atomistyki (PAA), podejmowanych w ramach przygotowań do sprawowania dozoru jądrowego nad przyszłymi obiektami energetyki jądrowej realizowanymi w ramach Programu Polskiej Energetyki Jądrowej (PPEJ). Prezes PAA będzie realizował swoje funkcje naczelnego organu dozoru jądrowego w Polsce na wszystkich etapach cyklu życiowego przyszłych elektrowni jądrowych, począwszy od etapu ich oceny środowiskowej i lokalizacji, przez etapy projektowania, budowy, rozruchu, eksploatacji, aż do likwidacji elektrowni. Wszelkie decyzje i opinie wydawane na tych etapach przez organy dozoru jądrowego poprzedzone być muszą odpowiednimi **analizami i ocenami bezpieczeństwa**. Ich prowadzenie należy do podstawowych obowiązków i zadań urzędu dozoru jądrowego. Artykuł **Szymona Suchcickiego** poświęcony jest zagadnieniu sprzężenia trójwymiarowych obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych w analizach bezpieczeństwa prowadzonych z wykorzystaniem nowoczesnych kodów obliczeniowych, m. in. w związku z wydawaniem zezwoleń dla nowych elektrowni jądrowych, w celu wyznaczania i oceny marginesów bezpieczeństwa tych elektrowni.

W drugim z zamieszczonych artykułów, poświęconym goszczącej od kilku numerów na naszych łamach problematyce narażenia na radon, **Zuzanna Podgórska** opisuje zmiany w polskim prawie wynikające z implementacji Dyrektywy Rady 2013/59/Euratom w odniesieniu do tej kwestii. Omawia przepisy dodane w tym zakresie do ustawy Prawo atomowe (na mocy nowelizacji z 2019 r.) oraz wynikające z nich zadania Prezesa PAA i obowiązki Głównego Inspektora Sanitarnego związane z tzw. Krajowym planem działania. Do najważniejszych z nich należy działalność informacyjna i edukacyjna podnosząca świadomość oddziaływania radonu na zdrowie ogółu społeczeństwa oraz dostępnych środków obniżania jego stężenia w pomieszczeniach.

Kolejne dwa artykuły nawiązują do zdarzeń z przeszłości związanych z wykorzystaniem energii atomowej.

**Andrzej Kasza i Paweł Król** przedstawiają interesujące fakty z mało znanego epizodu poszukiwań i wydobycia rudy uranu w Górach Świętokrzyskich. Poza ich opisem autorzy zamieścili wyniki własnych, punktowych pomiarów mocy dawki promieniowania gamma w obrębie hałd dawnych kopalń. Praktycznie nie wykazują one zwiększonego poziomu promieniowania.

Artykuł **Marka Niemczyka** jest interesującym przykładem spojrzenia osoby o humanistycznym profilu wykształcenia na przyczyny, przebieg oraz działania podjęte w celu likwidacji skutków awarii jądrowej w Czarnobylu. Ich opis zaczerpnięto z wprowadzenia do napisanej przez autora pracy magisterskiej. Zawiera on informacje pozyskane ze źródeł ukraińskich podczas pobytu w Czarnobylu jesienią 2021 r., a także wyniki przeprowadzonych w czarnobylskiej strefie wykluczenia własnych, punktowych pomiarów mocy dawki.

Bieżący numer zamyka komunikat **Wojciecha Głuszewskiego i Marii Kubickiej** z dorocznej konferencji Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej, która odbyła się z udziałem Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki w dniach 9–10 maja w Poznaniu.

Życzymy Państwu owocnej lektury,



Redaktor Naczelny  
*Maciej Jurkowski*



# Deterministyczne analizy bezpieczeństwa elektrowni jądrowych z wykorzystaniem sprzężonych obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych

## *Deterministic safety analyses of nuclear power plants with the use of coupled neutronic and thermal-hydraulic calculations*

Szymon Suchcicki  
Państwowa Agencja Atomistyki  
Szkoła Doktorska nr 4 Politechniki Warszawskiej

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono opis deterministycznych analiz bezpieczeństwa wykorzystujących sprzężone obliczenia neutronowe i ciepłno-przepływowe. Zaprezentowano metodyki przeprowadzania tego typu obliczeń oraz opisano przykłady zastosowania sprzężonych kodów neutronowych i ciepłno-przepływowych do analiz przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych i awarii mogących wystąpić w elektrowniach jądrowych.

**Słowa kluczowe:** Deterministyczne analizy bezpieczeństwa, elektrownie jądrowe, sprzężone obliczenia neutronowe i ciepłno-przepływowe.

**Abstract:** The paper presents a description of deterministic safety analyses with the use of coupled neutronic and thermal-hydraulic calculations. Methodologies for performing this type of calculations were presented and examples of the use of coupled neutronic and thermal-hydraulic codes for the analysis of anticipated operational occurrences and accidents that may occur in nuclear power plants were described.

**Keywords:** Deterministic safety analyses, nuclear power plants, coupled neutronic and thermal-hydraulic calculations.

## 1. Wstęp

W polskim prawie i w zaleceniach międzynarodowych dotyczących obiektów jądrowych występuje pojęcie deterministycznych analiz bezpieczeństwa. Są to analizy, w których określa się zachowanie obiektu jądrowego we wstępnie założonych określonych stanach eksploatacyjnych i w warunkach awaryjnych oraz ocenia się odpowiedniość jego rozwiązań projektowych – przez sprawdzenie spełnienia kryteriów i wymagań technicznych zawartych w przepisach prawa i normach technicznych [1]. Analizy deterministyczne obejmują również analizy, w których do obliczeń stosuje się sprzężone kody neutronowe i ciepłno-przepływowe. W przeszłości kody obliczeniowe dotyczące tych dwóch różnych dziedzin zostały stworzone do realizacji różnych celów i nie były praktycznie ze sobą

związane. Jednak wraz ze zwiększającymi się możliwościami obliczeniowymi komputerów, połączenie analiz neutronowych i ciepłno-przepływowych stało się wykonalne. Obecnie możliwe jest przeprowadzenie szczegółowych sprzężonych obliczeń ciepłno-przepływowych i trójwymiarowych obliczeń kinetyki reaktora.

Nowe rozwiązania wprowadzone do reaktorów jądrowych w celu ulepszenia cyklu paliwowego (m.in. wypalające się pochłaniacze neutronów, nowe konstrukcje kaset paliwowych i prętów regulacyjnych) spowodowały pojawienie się nowych potrzeb w zakresie analiz bezpieczeństwa. Aby odpowiedzieć na te potrzeby i poprawić możliwości eksploatacyjne elektrowni jądrowych, w ostatnich latach wykorzystuje się sprzężone trójwymiarowe obliczenia neutronowe i ciepłno-przepływowe do wyznaczania i oceny marginesów bezpieczeństwa tych elektrowni. Tego

rodzaju sprzężone analizy umożliwiają bardziej szczegółową ocenę bezpieczeństwa elektrowni jądrowych w porównaniu z analizami cieplno-przepływowymi wykorzystującymi jedynie punktowy (0-wymiarowy) model kinetyki reaktora, który powoduje, że ani promieniowy, ani osiowy rozkład mocy reaktora nie może się zmieniać w czasie badanego stanu przejściowego. Sprzężone trójwymiarowe obliczenia neutronowe i cieplno-przepływowe stosuje się szczególnie do analiz stanów przejściowych związanych z niesymetrycznymi zjawiskami zachodzącymi w rdzeniu reaktora oraz do analiz przewidywanych stanów przejściowych bez awaryjnego wyłączenia reaktora (ang. *Anticipated Transients Without Scram*). Przykładowe kody obliczeniowe używane do tego typu analiz to TRACE/PARCS, RELAP5/PARCS, RELAP5-3D/NESTLE, CATHARE/CRONOS i MARS/MASTER, gdzie TRACE, RELAP5, CATHARE i MARS to kody używane do obliczeń cieplno-przepływowych, natomiast PARCS, NESTLE, CRONOS i MASTER to kody przeznaczone do analiz neutronowych.

Sprzężenie obliczeń odbywa się poprzez wymianę informacji pomiędzy kodem neutronowym i cieplno-przepływowym, co przedstawiono na rysunku 1. Kod cieplno-przepływowy oblicza wartości parametrów chłodziwa i paliwa oraz przesyła je do kodu neutronowego, a także używa mocy neutronowej jako źródła ciepła do obliczeń przewodzenia ciepła. Natomiast kod neutronowy używa przekazanych mu wartości parametrów chłodziwa i paliwa do aktualizacji makroskopowych przekrojów czynnych na podstawie lokalnych warunków węzłowych, a następnie oblicza strumień neutronów w przestrzeni trójwymiarowej i przesyła węzłowy rozkład mocy.

## 2. Metodyki sprzężenia obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych

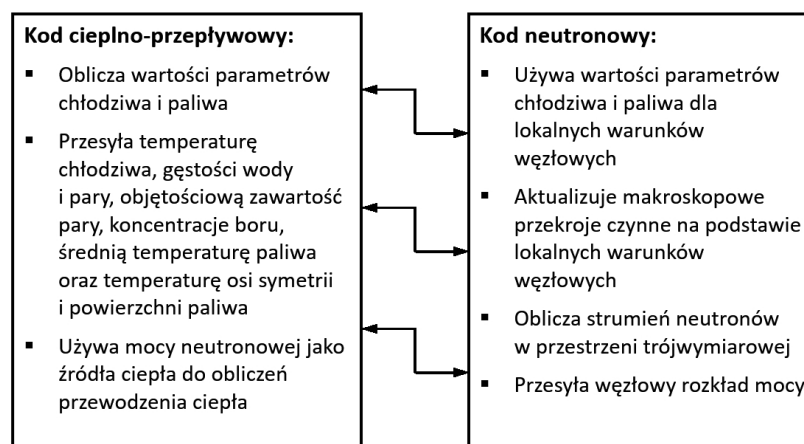
Sprzężenie obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych odbywa się według określonych zasad, które dotyczą różnych kwestii, takich jak m.in. sposoby sprzężenia

modeli neutronowych i cieplno-przepływowych, podejścia do sprzężenia, przestrzenny rozkład siatki obliczeniowej itd. [4]. Stosowanie opisywanych zasad modelowania pozwala na uzyskanie dokładnych wyników symulacji przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych i awarii w rozsądnym czasie obliczeniowym. Poniżej opisano wybrane kwestie dotyczące metodyk sprzężenia obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych.

### Sposoby sprzężenia

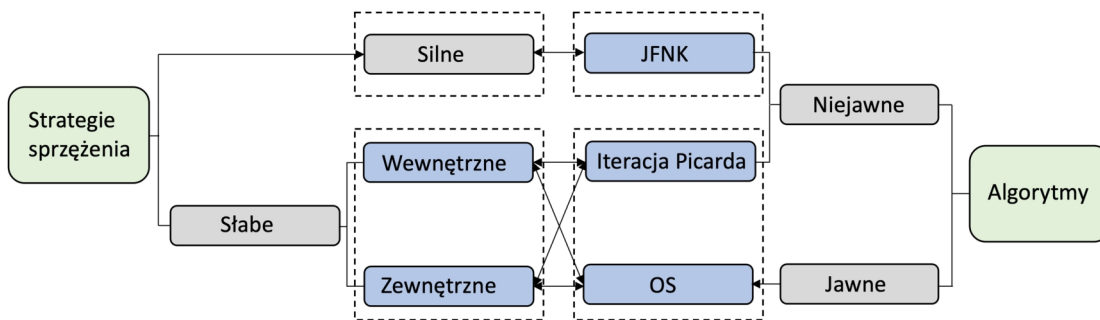
Modele rdzenia reaktora jądrowego, stworzone z wykorzystaniem kodów systemowych cieplno-przepływowych, składają się z punktowych lub jednowymiarowych modeli kinetyki neutronów, które są sprzężone z uśrednionym modelem dynamiki płynów obszaru rdzenia oraz z odpowiednim uśrednionym modelem struktur cieplnych prętów paliwowych. W większości kodów obliczeniowych punktowy model kinetyki neutronów może być powiązany z kilkoma równoległymi kanałami chłodziwa i z odpowiednimi modelami prętów paliwowych opisującymi części rdzenia reaktora. Takie uproszczone modele neutronowe mogą być rozszerzone do pełnych trójwymiarowych modeli i sprzężone z modelami cieplno-przepływowymi obszaru rdzenia reaktora. Połączenie modelu neutronowego z modelem cieplno-przepływowym może się odbywać na wiele sposobów przedstawionych na rysunku 2.

Strategie sprzężenia obliczeń neutronowych i cieplno-przepływowych można podzielić na sprzężenie silne i słabe (ang. *tight and loose coupling*). Pierwsze odnosi się do opracowania nowego kodu obliczeniowego w celu rozwiązania równań opisujących transport neutronów, przewodzenie ciepła i przepływ chłodziwa bez ich rozdzielania. Natomiast sprzężenie słabe oznacza, że równania opisujące transport neutronów oraz równania opisujące przewodzenie ciepła i przepływ chłodziwa są rozwiązywane osobno i w związku z tym mogą być do tego celu stosowane istniejące kody neutronowe i cieplno-przepływowe. Prawa strona rysunku 2 przedstawia algorytmy rozwiązywania



Rys. 1. Sprzężenie kodów neutronowych i cieplno-przepływowych (źródło: opr. własne na podstawie [8]).

Fig. 1. Coupling of neutronic and thermal-hydraulic codes (source: own study based on [8]).



Rys. 2. Klasyfikacja strategii i algorytmów sprzężenia (źródło: opr. własne na podstawie [13]).

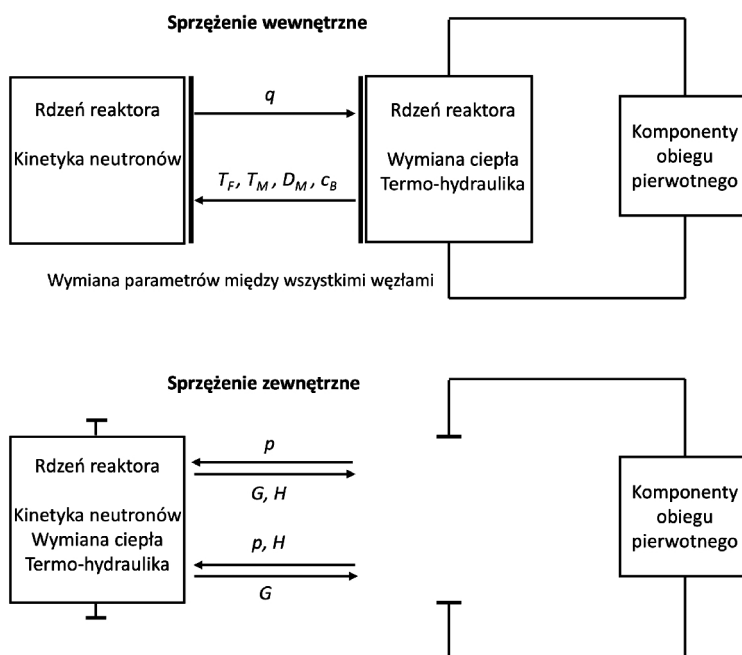
Fig. 2. Classification of coupling strategies and algorithms (source: own study based on [13]).

ww. równań. Zostały one podzielone na jawne i niejawne (ang. *explicit and implicit*). Jawnym schematem numerycznym jest metoda OS (ang. *Operator Splitting*), natomiast niejawne schematy numeryczne to metoda iteracji Picarda oraz metoda JFNK (Jacobian-Free Newton-Krylov). Metody te zostały szczegółowo opisane w pracy [13]. Z powodu trudności w opracowaniu kodów do sprzężenia silnego w obecnie przeprowadzanych analizach bezpieczeństwa stosuje się głównie sprzężenie słabe. Można je podzielić na sprzężenie wewnętrzne i zewnętrzne (rys. 3). W przypadku sprzężenia wewnętrznego trójwymiarowy model neutronowy jest zintegrowany z modelem ciepłno-przepływowym rdzenia reaktora wykonanym przy użyciu kodu systemowego przeznaczonego do obliczeń całej elektrowni. Każdy węzeł kinetyki neutronów jest sprzężony bezpośrednio z odpowiednią komórką ciepłno-przepływową rdzenia reaktora w kodzie systemowym, a jego obliczenia są wykonywane przy każdej iteracji kodu ciepłno-przepływowego. Ten sposób sprzężenia wiąże się z wymianą dużej ilości informacji pomiędzy kodem neutronowym i ciepłno-przepływowym, ale umożliwia szczegółowe obliczenia.

Jedną z głównych wad tej metody jest to, że wymaga ona znacznych modyfikacji w obydwu kodach. W przypadku sprzężenia zewnętrznego kod neutronowy jest połączony z oddzielnym modelem ciepłno-przepływowym rdzenia reaktora. Następnie jest on sprzęgany z systemowym kodem ciepłno-przepływowym poprzez przekazanie warunków brzegowych na górze i na dole rdzenia reaktora. Ta metoda ułatwia proces sprzężenia, ponieważ wymaga niewielkich modyfikacji kodów neutronowych i ciepłno-przepływowych lub nie wymaga ich wcale. Istnieją jednak pewne problemy z zewnętrznym sposobem sprzężenia związane z różnymi modelami ciepłno-przepływowymi dla samego rdzenia reaktora i dla całej elektrowni, co może prowadzić do niestabilności numerycznych i powolnej zbieżności.

### Podjęcia do sprzężenia

W celu połączenia modeli neutronowych i ciepłno-przepływowych stosuje się dwa różne podejścia: integrację szeregową (ang. *Serial Integration*) oraz przetwarzanie równo-



Rys. 3. Wymiana parametrów dla różnych sposobów sprzężenia (źródło: opr. własne na podstawie [4]).

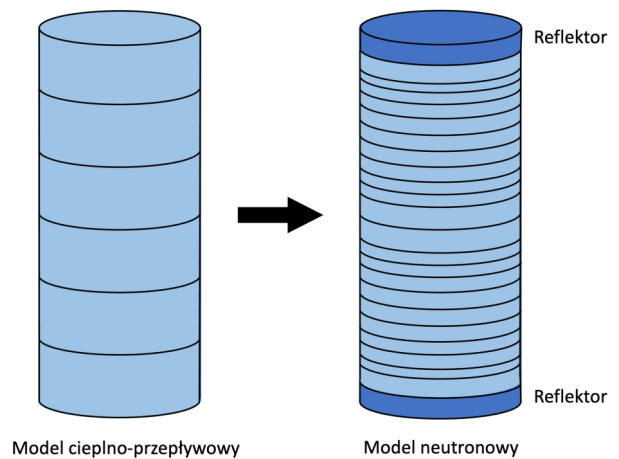
Fig. 3. Exchange of parameters for different ways of coupling (source: own study based on [4]).

ległe (ang. *Parallel Processing*). Pierwsze podejście polega na implementacji podprogramu neutronowego do kodu systemowego ciepłno-przepływowego. Wymaga to znacznych zmian w kodach w celu ich integracji i sekwencyjnego wykonywania modułów neutronowych i ciepłno-przepływowych. Natomiast drugie podejście polega na przeprowadzaniu oddzielnych obliczeń przez kod neutronowy i ciepłno-przepływowo oraz wymianie danych między tymi kodami podczas obliczeń. Wymiana informacji odbywa się zwykle przy użyciu tzw. równoległej maszyny wirtualnej (ang. *Parallel Virtual Machine*, PVM) lub tzw. interfejsu przekazywania wiadomości (ang. *Message Passing Interface*, MPI). PVM jest narzędziem do sprzęgania dużych, autonomicznych kodów i przeprowadzania obliczeń na wielu procesorach. Podejście polegające na przetwarzaniu równoległym daje możliwość poprawy wydajności kodu komputerowego. W sytuacji gdy model ciepłno-przepływowo rdzenia reaktora zawiera równoległe kanały, istnieje również możliwość przeprowadzania obliczeń dla różnych kanałów na różnych procesorach. W ten sposób czas obliczeń może być znacznie zredukowany, zwłaszcza w przypadku modelowania rdzeni dużych reaktorów typu BWR.

### Przestrzenny rozkład siatki

Model ciepłno-przepływowo rdzenia reaktora może być sprzężony z modelem neutronowym w sposób stały lub elastyczny. Pierwszy sposób polega na tym, że każdy kanał modelu ciepłno-przepływowego reprezentuje zwykle jedną kasetę modelu neutronowego. Natomiast drugi sposób umożliwia określenie schematów przyporządkowania elementów modelu ciepłno-przepływowego elementom modelu neutronowego. W tym przypadku trzeba rozważyć, czy dla analizowanego stanu przejściowego ważniejsza jest dokładność, czy szybkość obliczeń i w zależności od tego przyporządkować elementom jednego modelu odpowiednią liczbę elementów drugiego.

Przestrzenny schemat sprzężenia zależy od rodzaju modelu ciepłno-przepływowego rdzenia reaktora. Istnieją bowiem dwa rodzaje modeli – wielokanałowy model rdzenia (np. jednowymiarowe kanały równoległe stosowane do modelowania reaktorów BWR) i trójwymiarowy model zbiornika reaktora/rdzenia (np. do modelowania reaktorów PWR). Stworzenie odpowiedniej nodalizacji i schematów przyporządkowania (mapowania) pomiędzy modelem ciepłno-przepływowym rdzenia reaktora i modelem neutronowym musi być zrealizowane zarówno w kierunku osiowym, jak i promieniowym. Na rysunku 4 przedstawiono przykład osiowego schematu sprzężenia, gdzie każdemu węzłowi modelu ciepłno-przepływowego przyporządkowano kilka węzłów modelu neutronowego. Wybór odpowiedniego rozkładu siatki obliczeniowej w celu otrzymania dokładnych wyników dla danego stanu przejściowego w rozsądnym czasie obliczeniowym nie jest łatwym zadaniem. Dokładne i szczegółowe mapowanie umożliwia



Rys. 4. Osiowy schemat sprzężenia przestrzennego (źródło: opr. własne na podstawie [4]).

Fig. 4. Axial spatial coupling scheme (source: own study based on [4]).

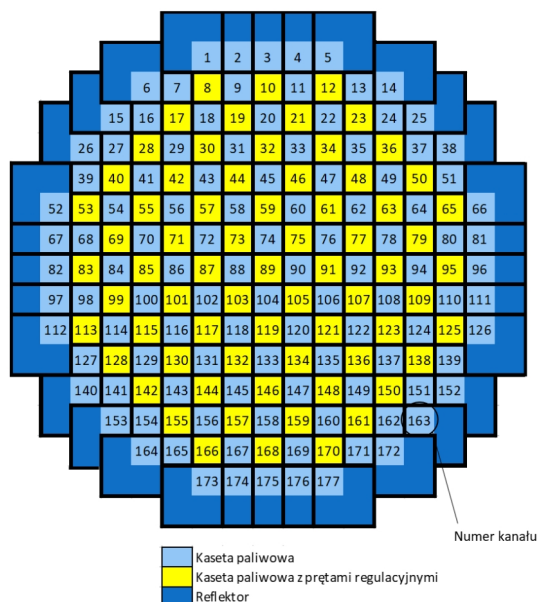
uzyskanie lepszych wyników obliczeń, jednak wymaga to zastosowania znacznych zasobów obliczeniowych. W przypadku stanów przejściowych ze zjawiskami przestrzennie niesymetrycznymi, szczegółowe modelowanie trójwymiarowe odgrywa ważną rolę w określaniu lokalnych parametrów i rozkładu mocy w rdzeniu reaktora podczas analizowanego stanu przejściowego.

Dla reaktorów PWR, w których występują promieniowe przepływy krzyżowe między kasetami paliwowymi, zalecane jest stosowanie trójwymiarowych modeli ciepłno-przepływowych rdzenia reaktora. Można do tego celu zastosować różne struktury przestrzenne siatki obliczeniowej. Bardzo ważne jest wykonanie sprzężenia w taki sposób, żeby uzyskać wystarczającą dokładność obliczeń przeprowadzonych w rozsądnym czasie. Systemowe kody ciepłno-przepływowo mają zwykle dwie opcje modelowania trójwymiarowego: wykorzystanie geometrii kartezjańskiej lub geometrii cylindrycznej. Przykład zastosowania geometrii kartezjańskiej przedstawiono na rysunku 5, gdzie zbiornik reaktora został podzielony promieniowo na 241 komórek, w tym 64 komórki reprezentujące reflektor. Model struktury cieplnej obejmuje 177 elementów, co odpowiada liczbie kaset paliwowych w rdzeniu reaktora.

Przykład wykorzystania geometrii cylindrycznej przedstawiono na rysunku 6, gdzie rdzeń reaktora i strefa reflektora zostały przyporządkowane do 24 komórek modelu ciepłno-przepływowego tworzonych przez 4 pierścienie i 6 sektorów azymutalnych. Geometria kartezjańska bardziej pasuje do modelu neutronowego rdzenia reaktora, zwłaszcza gdy każda kasetka modelu neutronowego jest sprzężona bezpośrednio z komórką modelu ciepłno-przepływowego zarówno w kierunku promieniowym, jak i osiowym. Tak szczegółowe mapowanie zapewnia uzyskanie lepszych wyników sprzężonych obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych.

Reaktory BWR zawierają dużą liczbę kaset paliwowych (od 370 do 800 [10]). Dokładne i szczegółowe obliczenia





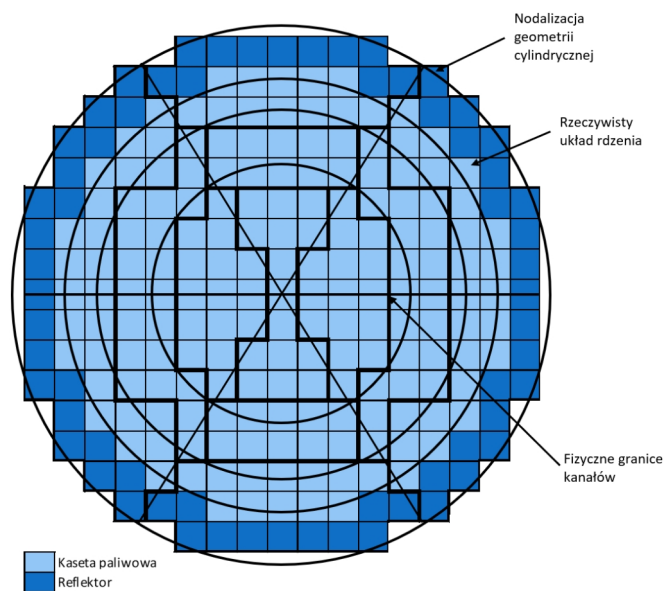
**Rys. 5.** Promieniowy schemat sprzężenia przestrzennego dla trójwymiarowego modelu ciepłno-przepływowego rdzenia reaktora PWR w geometrii kartezjańskiej (źródło: opr. własne na podstawie [4]).

**Fig. 5.** Radial spatial coupling scheme for a three-dimensional thermal-hydraulic model of the PWR reactor core in Cartesian geometry (source: own study based on [4]).

sprężonych modeli neutronowych i ciepłno-przepływowych rdzenia reaktora tego typu wymagają wykorzystania znacznych zasobów obliczeniowych. Z tego powodu często optymalizuje się takie obliczenia poprzez łączenie podobnych kaset paliwowych w jeden kanał modelu ciepłno-przepływowego, jednocześnie zachowując szczegółowy model neutronowy rdzenia reaktora. Jednak redukcja liczby kanałów modelu ciepłno-przepływowego wygładza rozkład mocy i reaktywnościowe sprzężenie zwrotne, dlatego należy tak dobrać liczbę kanałów modelu, aby uzyskać możliwie najdokładniejsze wyniki w rozsądnym czasie obliczeniowym. Podobne kasetki modelu neutronowego zwykle przyporządkowuje się do jednego kanału modelu ciepłno-przepływowego. Taki uśredniony kanał tworzy się na podstawie danych neutronowych i ciepłno-przepływowych uzyskanych z obliczeń w kodzie symulującym pracę rdzenia reaktora w warunkach ciepłno-przepływowych dla stanu ustalonego. Do przyporządkowania kilku kaset modelu neutronowego do kanału modelu ciepłno-przepływowego używa się takich danych, jak moc względna, natężenie przepływu chłodziwa, rozmieszczenie przestrzeni parowych, rodzaj paliwa itd.

### 3. Przykłady zastosowania sprzężonych kodów neutronowych i ciepłno-przepływowych

Sprężenie kodów neutronowych i ciepłno-przepływowych stosuje się do analiz stanów przejściowych, dla których występuje silny związek między zagadnieniami neutronowymi i ciepłno-przepływowymi, szczególnie do analiz



**Rys. 6.** Promieniowy schemat sprzężenia przestrzennego dla trójwymiarowego modelu ciepłno-przepływowego rdzenia reaktora PWR w geometrii cylindrycznej (źródło: opr. własne na podstawie [4]).

**Fig. 6.** Radial spatial coupling scheme for a three-dimensional thermal-hydraulic model of the PWR reactor core in cylindrical geometry (source: own study based on [4]).

stanów przejściowych związanych z niesymetrycznymi zjawiskami zachodzącymi w rdzeniu reaktora. Tego typu obliczenia wykorzystuje się m.in. do symulacji nieumyślnego wysunięcia lub wystrzelenia kasetki regulacyjnej z rdzenia reaktora, rozerwania głównego rurociągu parowego w elektrowni typu PWR, stanu przejściowego z nagłym wyłączeniem turbiny w elektrowni typu BWR, uruchomienia zimnej lub niezawierającej boru pętli obiegu chłodzenia, stanów przejściowych związanych z rozcieńczeniem boru oraz przewidywanych stanów przejściowych bez awaryjnego wyłączenia reaktora. Poniżej opisano wybrane przykłady zastosowania sprzężonych kodów neutronowych i ciepłno-przepływowych.

#### Awaria z wystrzeleniem kasetki regulacyjnej w reaktorze PWR

Awaria związana z wystrzeleniem kasetki regulacyjnej jest zdefiniowana jako uszkodzenie osłony mechanizmu napędowego prętów regulacyjnych, którego efektem jest całkowite wyrzucenie kasetki regulacyjnej z rdzenia reaktora. W wyniku takiego zdarzenia następuje nagły wzrost reaktywności i lokalny wzrost mocy połączony z początkowym wzrostem ciśnienia w obiegu chłodzenia reaktora. Nagły wzrost mocy jest szybko kompensowany przez efekt Dopplera zachodzący w paliwie, kiedy temperatura paliwa zaczyna rosnąć i może być zakończony przez wyłączenie reaktora. Sygnałem powodującym wyłączenie może być w takiej sytuacji wysokie tempo przyrostu, niski okres podwojenia lub wysoka wartość gęstości strumienia neutronów. Wielkość reaktywności wprowadzonej pod wpływem

takiej awarii i zmiana mocy zależą m.in. od głębokości zanurzenia kasety regulacyjnej przed awarią, wielkości wypalenia paliwa oraz od ilości i rodzaju paliwa w rdzeniu reaktora. Opis analizy takiej awarii zamieszczono w rozdziale 15.4 końcowego raportu bezpieczeństwa amerykańskiej wersji reaktora EPR [11].

### Awaria z rozerwaniem głównego rurociągu parowego w elektrowni z reaktorem PWR

Opis analizy takiej awarii zamieszczono w rozdziale 15.1 końcowego raportu bezpieczeństwa amerykańskiej wersji reaktora EPR [11]. Sytuacja, w której doszłoby do rozerwania głównego rurociągu parowego, charakteryzuje się znaczącymi efektami czasoprzestrzennymi zachodzącymi w rdzeniu reaktora, będącymi skutkiem niesymetrycznego chłodzenia po wyłączeniu reaktora. W opisywanej analizie założono, że w głównym rurociągu parowym powstanie otwór o powierzchni 0,1598 m<sup>2</sup> poza budynkiem reaktora, powyżej głównego zaworu odcinającego dopływ pary do turbiny, na końcu cyklu pracy reaktora i dla stanu gorącego na mocy zerowej (ang. *Hot Zero Power*), przy dostępnym zewnętrznym zasilaniu. Rozerwanie głównego rurociągu parowego zwiększyłoby szybkość oddawania ciepła przez obieg chłodzenia reaktora i zmniejszyłoby temperatury i ciśnienia w tym obiegu. Początkowo prędkość przepływu pary przez uszkodzony rurociąg wzrosłaby, natomiast z upływem czasu obniżałaby się z powodu spadku ciśnienia pary. Jednocześnie wzrosłaby reaktywność na skutek obniżenia temperatury w obiegu chłodzenia reaktora.

### Stan przejściowy z nagłym wyłączeniem turbiny w elektrowni z reaktorem BWR

Sytuacja, w której doszłoby do wyłączenia turbiny, byłaby efektem nagłego zamknięcia głównego zaworu odcinającego turbinę. Może ono być zainicjowane przez wiele uszkodzeń układu turbiny lub jądrowego układu wytwarzania pary. Sygnałem inicjującym mogą być np. silne drgania, zamknięcie głównego zaworu odcinającego turbinę przez operatora, niska próżnia skraplacza lub wysoki poziom wody w reaktorze. Zamknięcie głównego zaworu odcinającego turbinę powoduje nagłe zmniejszenie przepływu pary, czego efektem jest zwiększenie ciśnienia w jądrowym układzie wytwarzania pary. Zamknięcie zaworu odcinającego turbinę w trakcie pracy na wysokiej mocy powoduje wyłączenie reaktora, otwarcie zaworu obejściowego turbiny i w niektórych elektrowniach natychmiastowe wyłączenie pompy recyrkulacyjnej. Stan przejściowy związany z opisywanym wyłączeniem turbiny w elektrowni typu BWR jest uważany za jedno z najbardziej skomplikowanych zdarzeń, ponieważ wymaga analizy bardzo szybko zmieniających się parametrów związanych z rdzeniem reaktora, granicą ciśnieniową obiegu chłodzenia reaktora, zaworami i rurociągami. Szczegółowy opis takiego stanu

przejściowego znajduje się w dokumencie „Boiling Water Reactor Turbine Trip (TT) Benchmark” [9].

## Podsumowanie

Sprzężenie kodów komputerowych służących do trójwymiarowych obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych to stosunkowo nowa kwestia związana z analizami bezpieczeństwa najlepszego oszacowania zarówno dla reaktorów lekkowodnych, jak i innych typów reaktorów.

Połączenie trójwymiarowych obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych jest bardzo korzystne dla analiz bezpieczeństwa przeprowadzanych w związku z wydawaniem zezwoleń dla nowych elektrowni jądrowych, poprawą bezpieczeństwa istniejących obiektów, okresową oceną bezpieczeństwa oraz przedłużaniem zezwoleń. Takie podejście jest również bardzo przydatne do wyznaczania marginesów bezpieczeństwa w celu zwiększenia mocy reaktorów, do analiz wykonywanych na potrzeby lepszego wykorzystania paliwa jądrowego i większej elastyczności eksploatacyjnej reaktorów, uzasadnienia wydłużenia pracy reaktorów, a także do analiz zdarzeń eksploatacyjnych oraz do opracowywania nowych procedur awaryjnych.

### Notka o autorze

**mgr inż. Szymon Suchcicki** – Główny Specjalista w Wydziale Analiz i Zezwoleń Departamentu Bezpieczeństwa Jądrowego Państwowej Agencji Atomistyki, doktorant w Szkole Doktorskiej nr 4 Politechniki Warszawskiej.

## Literatura

1. Dziennik Ustaw z dnia 20 września 2012 r., poz. 1043, *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania analiz bezpieczeństwa przeprowadzanych przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego, oraz zakresu wstępnego raportu bezpieczeństwa dla obiektu jądrowego.*
2. Hämäläinen A., *Applying Thermal Hydraulics Modeling in Coupled Processes of Nuclear Power Plants: Dissertation.* VTT Technical Research Centre of Finland, October 2005.
3. IAEA TECDOC-1539, *Use and Development of Coupled Computer Codes for the Analysis of Accidents at Nuclear Power Plants.* Proceedings of a technical meeting held in Vienna, 26–28 November 2003.
4. Ivanov K., Avramova M., *Challenges in Coupled Thermal-hydraulics and Neutronics Simulations for LWR Safety Analysis,* Annals of Nuclear Energy, Vol. 34, p. 501–513, June 2007.
5. Ivanov K., Beam T., Baratta A., Irani A., Trikourous N., *PWR Main Steam Line Break Benchmark,* Volume 1: Final Specifications, NEA/NSC/DOC(99)8, Nuclear Energy Agency, April 1999.
6. Kozłowski T., Miller R. M., Downar T. J., Barber D. A., Joo H. G., *Consistent Comparison of the Codes RELAP5/PARCS and TRAC-M/PARCS for the OECD MSLB Coupled Code Benchmark,* Nuclear Technology, Vol. 146, p. 15-28, April 2004.
7. Mascari F., Vella G., Casamassima V., Parozzi F., *Analyses of TRACE-PARCS Coupling Capability,* 20th International Conference: Nuclear Energy for New Europe 2011, 12-15 September 2011.

8. Novog D., *Neutronic and Thermal-hydraulic Coupling*, Joint ICTP-IAEA Course on Science and Technology of Supercritical Water Cooled Reactors, 27 June – 1 July 2011.
9. Solis J., Ivanov K., Sarikaya B., Olson A., Hunt K. W., *Boiling Water Reactor Turbine Trip (TT) Benchmark*, Volume 1: Final specifications, NEA/NSC/DOC (2001)1, Nuclear Energy Agency, February 2001.
10. *Typical Boiling-Water Reactor*, <https://www.nrc.gov/reactors/bwrs.html> (dostęp 10.05.2022).
11. *US EPR Final Safety Analysis Report*, <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/epr/reports.html#fsar> (dostęp 10.05.2022).
12. *US NRC Regulatory Guide 1-206 - Combined License Applications for Nuclear Power Plants, Appendix C.I.15-A*.
13. Wang J., Wang Q., Ding M., *Review on neutronic/thermal-hydraulic coupling simulation methods for nuclear reactor analysis*, Annals of Nuclear Energy, Volume 137, March 2020.

# Aktualne przepisy dotyczące ochrony przed narażeniem na radon w Polsce

## *Current regulations on protection against radon exposure in Poland*

Zuzanna Podgórska

Fundacja Forum Atomowe, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

**Streszczenie:** W artykule opisano zmiany w polskim prawie wynikające z implementacji Dyrektywy Rady 2013/59/Euratom w odniesieniu do ochrony przed narażeniem na radon. Scharakteryzowano przepisy dodane w tym zakresie do ustawy – Prawo atomowe na mocy nowelizacji z 2019 r. (Dz.U. poz. 1593), opisano zadania Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) oraz Głównego Inspektora Sanitarnego wynikające z implementacji przepisów znowelizowanej ustawy w odniesieniu do ochrony przed narażeniem na radon wewnątrz pomieszczeń.

**Słowa kluczowe:** Radon, ustawa – Prawo atomowe, narażenie na radon, Krajowy plan działania w przypadku narażenia na radon, Dyrektywa 2013/59/Euratom.

**Abstract:** The article describes recent changes in Polish law as a consequence of the implementation of the Directive 2013/59/Euratom with regard to protection against exposure to radon. The main points in the amended Atomic Law were indicated. The activities of the National Atomic Energy Agency (PAA) and the Chief Sanitary Inspector were described. And important documents related directly to the National Action Plan in the event of exposure to radon and the implementation of its statements were specified.

**Keywords:** Radon, Atomic Law Act, radon hazard, Radon Action Plan, Directive 2013/59/Euratom.

## 1. Wprowadzenie

Radon jest jednym z naturalnie występujących pierwiastków promieniotwórczych. Występuje w środowisku jako jeden ze składników powietrza atmosferycznego i drogą oddechową dostaje się do wnętrza organizmu. Pomimo że dawka promieniowania pochodząca od radonu i jego pochodnych ma znaczny udział w rocznej dawce efektywnej otrzymywanej przez mieszkańców Polski, dawka ta, jako pochodząca ze źródeł naturalnych, nie była wliczana do dawki otrzymywanej w miejscach pracy – nie licząc specyficznych miejsc pracy pod Ziemią, w których narażenie na promieniowanie pochodzące od radonu regulowały odrębne przepisy [1, 2]. Według Światowej Organizacji Zdrowia radon jest obok palenia tytoniu jedną z najczęstszych przyczyn powstawania raka płuc u ludzi na świecie [3]. Ponadto, jak zostało opisane w Dyrektywie Rady 2013/59/Euratom, uznaje się, że połączenie palenia tytoniu i wysokiego narażenia na radon powoduje znacznie wyższe ryzyko wystąpienia raka płuc u pojedynczej osoby niż

każdy z tych czynników z osobna, oraz że palenie tytoniu zwiększa ryzyko wynikające z narażenia na radon na poziomie populacji [4].

W wyniku nowelizacji ustawy – Prawo atomowe z 2019 r. (Dz. U. poz. 1593) do polskiego porządku prawnego wprowadzone zostały nowe przepisy prawne regulujące zasady ochrony pracowników narażonych na podwyższone stężenie aktywności radonu w powietrzu. Na podstawie art. 23f ust. 4 ustawy – Prawo atomowe ogłoszony został Krajowy plan działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy. Zostały zdefiniowane zadania pracodawców i organów nadzorujących oraz instytucji odpowiedzialnych m.in. za działalność informacyjną, prowadzenie prac badawczych i podnoszenie świadomości wpływu radonu na zdrowie, które to mają doprowadzić do realizacji głównego celu określonego w Krajowym planie działania, jakim jest ograniczenie ryzyka negatywnego wpływu występującego w środowisku radonu na zdrowie ludzi.



## 2. Przepisy europejskie

Przepisy regulujące sytuację prawną związaną z ochroną przed narażeniem na radon oraz zakresem odpowiedzialności w tej dziedzinie zostały wprowadzone w celu implementacji dyrektywy Rady 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiającej podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz **uchylającej dyrektywy** 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, **96/29/Euratom**, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom [4].

Wyżej wspomniana dyrektywa stanowi akt prawa wtórnego Unii Europejskiej wydany na podstawie Traktatu ustanawiającego Europejską Wspólnotę Energii Atomowej.

Na podstawie art. 31 Traktatu uchwalono kompleksowy zestaw prawodawstwa ustanawiającego podstawowe normy bezpieczeństwa. Jego podstawą była dyrektywa 96/29/Euratom ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w zakresie ochrony zdrowia pracowników i ogółu społeczeństwa przed zagrożeniami wynikającymi z promieniowania jonizującego (dyrektywa Euratom w sprawie podstawowych norm bezpieczeństwa) [5].

Jak zostało opisane w preambule dyrektywy, prawodawstwo Euratom było zawsze zgodne z zaleceniami Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP). W związku z tym wydanie przez ICRP nowych wytycznych dotyczących systemu ochrony przed promieniowaniem (publikacja nr 103, 2007 r.) [6], w oparciu o aktualne badania naukowe, spowodowało zmiany prawne w odniesieniu do ochrony przed promieniowaniem jonizującym w związku ze zidentyfikowaniem następujących problemów:

- postęp naukowy nie znajduje pełnego odzwierciedlenia w obowiązujących przepisach,
- istnieją rozbieżności między obowiązującymi aktami prawnymi,
- zakres obowiązującego prawodawstwa nie obejmuje w pełni naturalnych źródeł promieniowania ani ochrony środowiska.

W związku z tym zdefiniowane zostały cztery szczególne cele:

- wprowadzenie niezbędnych rzeczowych poprawek w celu uwzględnienia najnowszych danych naukowych i doświadczeń eksploatacyjnych,
- sprecyzowanie wymogów i zapewnienie spójności z europejskim dorobkiem prawnym,
- zapewnienie spójności z międzynarodowymi zaleceniami,
- uwzględnienie pełnego zakresu sytuacji i kategorii narażenia [4].

Pozostałe prawodawstwo opierające się na art. 31 traktatu, szczególnie istotne z punktu widzenia ochrony przed narażeniem na promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu, obejmuje także:

- zalecenie Komisji (Euratom) nr 90/143 z dnia 21 lutego 1990 r. w sprawie ochrony ludności przed narażeniem od radonu wewnątrz pomieszczeń oraz
- zalecenie Komisji 2001/928/Euratom z dnia 20 grudnia 2001 r. w sprawie ochrony ludności przed narażeniem od radonu w zasobach wody pitnej.

Członkowie wspólnoty Euratom są zobowiązani na mocy traktatu do ustanowienia jednolitych podstawowych norm bezpieczeństwa. Wymóg ten spełnia nowa dyrektywa 2013/59/Euratom.

## 3. Ustawa – Prawo atomowe

W celu implementacji dyrektywy Rady 2013/59/Euratom w 2019 roku znowelizowana została ustawa z dnia 29 listopada 2000 roku – Prawo atomowe [7]. Ustawa ta weszła w życie 30 dni od dnia ogłoszenia, tj. 23 września 2019 r.

Na mocy ww. nowelizacji do ustawy – Prawo atomowe dodano art. 23b–23g określające zasady ochrony przed narażeniem na radon w miejscach pracy i w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz określono zakres odpowiedzialności za działania informacyjne i monitorowanie narażenia na radon m.in. w miejscach pracy i budynkach użyteczności publicznej.

Ustalony został poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń oraz pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi – w wysokości 300 Bq/m<sup>3</sup>. Co istotne, pod pojęciem narażenia na radon, stosownie do art. 3 pkt 15a, należy rozumieć narażenie na promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu-222 (<sup>222</sup>Rn) i jego pochodnych – krótkożyciowych produktów rozpadu radonu, czyli izotopów ołowiu, polonu i bizmutu.

Kierownicy jednostek wykonujących działalność, w której występują miejsca pracy:

1. zlokalizowane wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia 300 Bq/m<sup>3</sup>,
2. pod ziemią,
3. związane z uzdatnianiem wód podziemnych na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia,

zapewniają w tych miejscach pracy pomiar stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu [8].

Informacja o terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia 300 Bq/m<sup>3</sup>, została określona w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie

budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz.U. z 2020 poz. 1139). Lista obejmuje 27 powiatów i miast na prawach powiatów z 6 województw:

W województwie dolnośląskim powiaty: dzierzoniowski, jeleniogórski, kamiennogórski, kłodzki, lubański, lwówecki, polkowicki, trzebnicki, wałbrzyski, ząbkowicki, zgorzelecki, złotoryjski oraz miasta na prawach powiatu: Jelenia Góra i Wałbrzych. W województwie lubelskim – powiat tomaszowski. W województwie opolskim powiaty nyski i prudnicki. W województwie podkarpackim powiaty: bieszczadzki, jasielski, krośnieński, leski, mielecki, sanocki. W województwie śląskim – powiat cieszyński. W województwie świętokrzyskim powiaty: kielecki, opatowski, skarżyski [10].

Do miejsc pracy narażonych na występowanie podwyższonego stężenia radonu, poza znajdującymi się na wyżej wymienionych terenach, zalicza się także:

- podziemne trasy turystyczne – przewodnicy i pracownicy techniczni;
- jaskinie i inne naturalne pustki w górotworze, które są miejscami pracy speleologów, klimatologów, biologów i innych pracowników nauki;
- sanatoria wykorzystujące radon w celach leczniczych – pracownicy obsługujący kuracjuszy;
- ośrodki spa oferujące różne formy subterranoterapii, tj. zabiegi wykonywane pod powierzchnią ziemi, np. w nieczynnych wyrobiskach górniczych;
- miejsca wydobywania ropy naftowej lub gazu ziemnego;
- miejsca wydobywania rud metali;
- miejsca pracy pod ziemią, w których, mimo podjęcia działań zgodnie z zasadą optymalizacji, poziom stężenia energii potencjalnej promieniowania alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w tych miejscach pracy wskazuje na możliwość otrzymania przez pracownika dawki skutecznej większej niż 1 mSv rocznie;
- budynki użyteczności publicznej (np. szkoły, przedszkola, żłobki, szpitale oraz zamieszkania zbiorowego – domy pomocy społecznej, domy dziecka, internaty, domy studenckie) na terenach wskazanych w rozporządzeniu ministra właściwego do spraw zdrowia wydanym na podstawie art. 23c ust. 7 ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe;
- stacje uzdatniania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, w których w wyniku przeprowadzonych pomiarów stężenia radonu na ujęciu stwierdzono w wodzie przekraczanie wartości parametrycznej określonej w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. poz. 2294), tj. 100 Bq/l [11];
- stacje uzdatniania wody wykorzystywanej na pływalniach, jeżeli woda doprowadzana na pływalnię nie jest wodą przeznaczoną do spożycia przez ludzi;
- podziemne parkingi, magazyny i stacje metra oraz tunele (drogowe i kolejowe), jeśli są miejscem pracy.

Kierownicy jednostek mają obowiązek zapewnić optymalizację narażenia pracowników wykonujących czynności

w tych miejscach pracy oraz informować na bieżąco na piśmie takich pracowników o zwiększonym narażeniu na radon, wynikach pomiarów stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w miejscu pracy.

W przypadku gdy w ww. miejscach pracy wynik pomiaru będzie wskazywał na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia (300 Bq/m<sup>3</sup>), kierownicy tych jednostek mają obowiązek podjęcia działań zapewniających ograniczenie narażenia pracowników na radon. Podjęte działania mogą polegać na wprowadzeniu rotacji pracowników, wprowadzeniu pracy zmianowej, zwiększeniu wymiany powietrza, zastosowaniu odpowiedniej wentylacji pomieszczeń w danym miejscu pracy lub montażu dodatkowych rozwiązań technicznych usuwających powietrze zawierające znaczne ilości radonu bezpośrednio spod budynku.

#### 4. Zadania Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki

W art. 23g ustawy – Prawo atomowe określone zostały zadania Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki:

- 1) organizacja kampanii promującej stosowanie środków mających na celu zapobieganie przenikaniu radonu do nowych budynków,
- 2) prowadzenie działań informacyjno-edukacyjnych oraz szkoleniowych o dostępnych środkach zapobiegania przenikaniu radonu do nowych budynków,
- 3) monitorowanie stosowania środków mających na celu zapobieganie przenikaniu radonu do nowych budynków,
- 4) możliwość współpracy w zakresie spraw określonych w pkt 1 i 2 z samorządami zawodowymi architektów i inżynierów budownictwa oraz innymi organizacjami zawodowymi i stowarzyszeniami zawodowymi, organami samorządu terytorialnego, a także specjalistami z zakresu ochrony przed promieniowaniem jonizującym,
- 5) zamieszczanie w Biuletynie Informacji Publicznej na swojej stronie podmiotowej informacji o instrumentach służących finansowaniu środków mających na celu zapobieganie przedostawaniu się radonu do nowych budynków oraz dobrych praktyk [8].

#### 5. Obowiązki Głównego Inspektora Sanitarnego

Jednym z najistotniejszych obecnie dokumentów opracowanych przez Główny Inspektorat Sanitarny jest Krajowy plan działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy. Został on ogłoszony w formie obwieszczenia Ministra Zdrowia dnia 22 stycznia 2021 r. [9].

W dokumencie opisany jest cel zasadniczy, tj. ograniczenie ryzyka negatywnego wpływu występującego w środowisku radonu na zdrowie ludzi. Cel zasadniczy osiągnąć jest przez realizację celów szczegółowych, które wynikają bezpośrednio z art. 23f ustawy Prawo atomowe:

- 1) wskazanie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia 300 Bq/m<sup>3</sup>,
- 2) ochrona pracowników przed ryzykiem negatywnego wpływu na zdrowie w związku z narażeniem ich na występujący w środowisku radon,
- 3) ograniczenie ryzyka wystąpienia nowotworu płuc u osób palących w związku z narażeniem tych osób na występujący w środowisku radon,
- 4) ocena narażenia na radon – pomiary: planowanie, określenie optymalnej metody, wykonywanie i gromadzenie wyników,
- 5) promowanie działań mających na celu ograniczenie ryzyka negatywnego wpływu na zdrowie w związku z narażeniem ludzi na występujący w środowisku radon,
- 6) określenie wpływu występującego w środowisku radonu na zdrowie publiczne,
- 7) ocena Krajowego planu radonowego w zakresie jego kompletności i aktualności.

Rolą Głównego Inspektora Sanitarnego jest także określanie dobrych praktyk dotyczących sposobu pomiarów stężenia radonu w glebie i w pomieszczeniach, a także zamieszczanie w Biuletynie Informacji Publicznej na swojej stronie podmiotowej informacji o instrumentach służących finansowaniu środków mających na celu ograniczenie średnioroczного stężenia radonu w budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz dobrych praktykach.

Zgodnie z art. 23g ust. 2 ustawy – Prawo atomowe rolą Głównego Inspektora Sanitarnego jest m.in. prowadzenie działalności informacyjnej i szkoleniowej oraz organizowanie kampanii promujących stosowanie środków mających na celu ograniczenie średnioroczного stężenia radonu w budynkach, lokalach i pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi.

Krajowy plan działania zawiera dodatkowo opis metod obniżania stężenia aktywności radonu w budynkach i doprecyzowuje wymagania dotyczące procedury przeprowadzania pomiarów średnioroczного stężenia radonu w miejscach pracy oraz wymagań w odniesieniu do laboratoriów wykonujących ww. pomiary.

Zgodnie z przepisami do dnia 22 września 2024 r. ww. pomiarów mogą dokonywać (poza laboratoriami mającymi akredytację) także nieakredytowane podmioty, które posiadają system zapewnienia jakości wykonywanych badań, wyposażenie, warunki lokalowe i środowiskowe, zapewniające prawidłowość dokonywania pomiarów. Ponadto muszą one zostać pozytywnie zweryfikowane

w międzylaboratoryjnych pomiarach porównawczych organizowanych przez Głównego Inspektora Sanitarnego.

## 6. Informowanie społeczeństwa o narażeniu na radon

Niezwykle istotne dla osiągnięcia głównego celu jest realizowanie wszystkich zaleceń szczegółowych Krajowego planu działania, w tym również działalności informacyjnej i edukacyjnej pozwalającej na zwiększenie świadomości występowania radonu w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy i jego wpływu na zdrowie.

Edukacja ludności powinna zgodnie z założeniem Krajowego planu działania obejmować także odpowiednie osoby z mocą decyzyjną w zakresie zagrożeń dla zdrowia spowodowanych przez radon, upowszechnianie Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach, informowanie o znaczeniu i możliwościach wykonywania pomiarów stężenia aktywności radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń.

Kolejnym działaniem mającym na celu podnoszenie świadomości oddziaływania radonu na zdrowie jest informowanie o dostępnych środkach i metodach obniżania stężenia tego pierwiastka w pomieszczeniach.

Informacje kierowane do ogółu społeczeństwa w obszarze związanym z zagadnieniami dotyczącymi radonu, zgodnie z Krajowym planem działania, powinny zawierać m.in. takie elementy, jak podstawowe wiadomości na temat radonu – jego właściwości, występowania i powstawania oraz mechanizmu jego przedostawania się do wnętrza budynków czy o jego obecności w wodzie przeznaczonej do spożycia. Ponadto należy podkreślać wpływ radonu na zdrowie i występowanie zwiększonego ryzyka zapadalności na nowotwór płuc u osób palących papierosy oraz wśród biernych palaczy.

Określony w Krajowym planie sposób prowadzenia kampanii informacyjnej skierowanej do społeczeństwa składa się z kilku oddzielnych zadań. Jedno z nich to opracowanie materiałów informacyjno-edukacyjnych dotyczących zagadnień związanych z radonem oraz opracowanie materiałów szkoleniowych dla organów Państwowej Inspekcji Sanitarnej. Za to zadanie odpowiedzialny jest Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego – Państwowy Zakład Higieny i Instytut Medycyny Pracy im. prof. dra med. Jerzego Nofera w Łodzi.

Kolejne działania edukacyjno-informacyjne należy kierować w szczególności do młodzieży – głównie na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia, tj. 300 Bq/m<sup>3</sup>, wskazanych w rozporządzeniu wydanym na podstawie art. 23c ust. 7 ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe.



Ponadto mają powstać filmy poglądowe (instruktażowe) dostępne w Internecie dla osób zaniepokojonych ewentualnym występowaniem w ich domach radonu, wykłady dla nauczycieli fizyki i chemii ze szkół podstawowych i średnich, wykłady o radonie na uczelniach technicznych, medycznych i na wybranych kierunkach na uniwersytetach (fizyka, chemia, biologia, geologia, geografia, architektura, budownictwo i innych).

## 7. Podsumowanie

Postęp naukowy oraz wyniki prowadzonych badań wpływu promieniowania pochodzącego od radonu na zdrowie spowodował, że została zidentyfikowana potrzeba aktualizacji obowiązujących przepisów prawa. Zgodnie z nowymi zaleceniami ICRP nr 103, 2007 r. zostały określone m.in. w bardziej szczegółowy sposób zasady postępowania w każdej z sytuacji narażenia, bez względu na to, czy źródło promieniowania jest związane z działalnością człowieka, czy też jest to źródło naturalne. Oprócz sytuacji narażenia planowanego i narażenia wyjątkowego określono dokładnie sytuacje związane z narażeniem od naturalnych źródeł promieniowania, czyli tzw. narażeniem istniejącym.

Opisywane w artykule przepisy ustawy – Prawo atomowe dodane w wyniku nowelizacji tej ustawy z 2019 r. wprowadzają zmiany w przepisach w miejscach pracy i budynkach użyteczności publicznej oraz w zakresie obowiązków pracodawców. Oprócz wykonywania pomiarów kluczowa jest optymalizacja narażenia osób, w przypadku potwierdzenia przekroczenia wartości odniesienia  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

Świadomość zagrożenia wynikającego z oddziaływania promieniowania pochodzącego od radonu na zdrowie jest jeszcze w Polsce relatywnie niska. W tej sytuacji stanowi to duże wyzwanie dla organów odpowiedzialnych za prowadzenie i koordynowanie działań informacyjnych oraz za prowadzenie monitoringu w miejscach pracy i miejscach przebywania ludzi, takich jak budynki użyteczności publicznej. Zwłaszcza że nowe regulacje dotyczą zjawiska, które jako związane z radioaktywnością, może być postrzegane jako dosyć skomplikowane i budzić niepokój z powodu słabej znajomości istoty tego zagadnienia wśród ogółu społeczeństwa.

Mając jednak na uwadze główny cel, jakim jest ograniczenie ryzyka negatywnego wpływu występującego w środowisku radonu na zdrowie ludzi, wszystkie szczegółowe

cele i działania pośrednie powinny zostać przeprowadzone w sposób zapewniający sprawną i skuteczną realizację celu głównego.

## Notka o autorze

**Mgr inż. Zuzanna Podgórska** – doktorantka w Zakładzie Fizyki Jądrowej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, Inspektor Ochrony Radiologicznej IOR-3, członek European Radon Association, Fundacji Forum Atomowe, członek zarządu Stowarzyszenia Rzeczniczy Nauki, Ekspert ds. Radonu i regional sales manager w laboratorium Radonova. Popularyzatorka nauki, finalistka konkursu Popularyzator Nauki 2021.

## Literatura

1. Rozporządzenia Ministra Energii z 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (publikator z Dz.U.).
2. Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2017 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz.U. z 2015 r., poz. 1702 ze zm.).
3. World Health Organization, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, 2009.
4. Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego (Dz.Ur. UE L 13 z. 17.01.2014 r., s. 1–73).
5. Dyrektywa Rady 96/29/Euratom z dnia 13 maja 1996 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w zakresie ochrony zdrowia pracowników i ogółu społeczeństwa przed zagrożeniami wynikającymi z promieniowania jonizującego, Dz.U. L 159 z 29.6.1996, s. 1.
6. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4).
7. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2001 r. Nr 3, poz. 18 ze zm., tj. Dz. U. z 2021 r., poz. 1941).
8. Ustawa z dnia 13 czerwca 2019 r. o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej (Dz.U. z 2019 r., poz. 1593).
9. Obwieszczenia Ministra Zdrowia z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie ogłoszenia Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy.
10. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz.U. z 2020 r., poz. 1139).
11. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. poz. 2294).



# Wydobycie i poszukiwania rud uranu w Górach Świętokrzyskich. Przyczynek do oceny stanu zagrożenia środowiska

## *Exploitation and exploration of uranium ores in the Holy Cross Mts. Contribution to the environmental risk assessment*

Andrzej Kasza<sup>a</sup>, Paweł Król<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Stowarzyszenie Speleoklub Świętokrzyski w Kielcach, Zakład Fizyki Medycznej Świętokrzyskiego Centrum Onkologii w Kielcach

<sup>b</sup> Dział Historii Naturalnej Muzeum Narodowego w Kielcach

**Streszczenie:** W związku z rozwojem radzieckiego programu atomowego, w latach 50. XX w. w Górach Świętokrzyskich prowadzono poszukiwania rud uranu. Metody poszukiwawcze opierały się w pierwszej kolejności na pracach o charakterze rewizyjnym czynnych i nieczynnych kopalń rud miedzi i żelaza, m.in. w Rudkach k. Nowej Słupi, Miedzianej Górze k. Kielc, Winnej k. Łagowa, okolicach Daleszyc, Wzdole – Kamieńcu k. Bodzentyna i w Miedziance k. Chęciny. Eksploatację rudy uranu prowadzono jedynie w Rudkach. Autorzy artykułu wykonali pomiary radioaktywności hałd w opisywanych kopalniach i miejscach poszukiwań uranu, w kontekście potencjalnego zagrożenia środowiska. Praca ma charakter przyczynkowy.

**Słowa kluczowe:** Uran, promieniotwórczość, kopalnia, Góry Świętokrzyskie, zagrożenie radiologiczne.

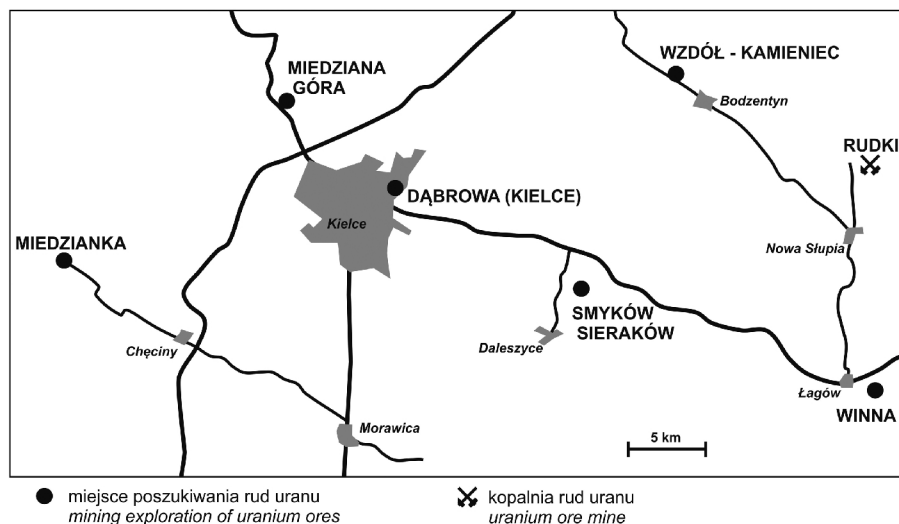
**Abstract:** In connection with the development of the Soviet nuclear program, a search for uranium ores was carried out in the Holy Cross Mts. in the 1950s. The exploration methods were based in the first place on revision works of active and closed copper and iron ore mines, including Rudki near Nowa Słupia, Miedziana Góra near Kielce Winna near Łagów, near Daleszyce, Wzdół – Kamieniec near Bodzentyn and in Miedzianka near Chęciny. The mining of uranium ores was carried out only in Rudki near Nowa Słupia. The authors of the article carried out measurements of the radioactivity of heaps in the described mines and uranium prospecting sites in the context of the potential threat to the environment. The work is contributory.

**Keywords:** Uranium, radiation, mine, Holy Cross Mts., environmental threat.

## Wstęp

Dzieje górnictwa uranowego stanowią niewielki, ale bardzo interesujący epizod w historii eksploatacji złóż mineralnych w Polsce. Wydobycie i poszukiwania rud uranu w naszym kraju związane były z okresem zimnej wojny i rozwojem radzieckiego programu atomowego. Ich eksploatację prowadzono w kilku miejscach na Dolnym Śląsku oraz w kopalni pirytu „Staszic” w Rudkach k. Nowej Słupi. Poza tymi znanymi już lokalizacjami działalności górniczej istnieje wiele miejsc w Polsce, w których specjaliści radzieccy prowadzili prace poszukiwawcze [1]. Dopiero zniesienie cenzury po 1989 r. oraz odtajnienie dokumentów znajdujących się w polskich archiwach stworzyło możliwość sięgnięcia do źródeł i oceny skali tego zjawiska.

Rozpoznanie złóż uranu w Polsce rozpoczęte zostało w 1951 r. przez Zakłady Przemysłowe R-1 w Kowarach na Dolnym Śląsku. Na podstawie umowy zawartej w 1947 r. między Polską a ZSRR ustalono powołanie specjalistycznego przedsiębiorstwa do poszukiwania, wydobycia, przerobu i eksportu rudy uranowej. Początkowo nosiło ono nazwę „Kowarskie Kopalnie”, a od 1951 r. „Zakłady Przemysłowe R-1. Państwowe Przedsiębiorstwo Wyodrębnione” z siedzibą w Kowarach, które funkcjonowało do 1973 r. [2]. Metody poszukiwawcze opierały się w pierwszej kolejności na pracach o charakterze rewizyjnym czynnych i nieczynnych kopalni, starych hałd, zwałów szlaki przy zakładach przetwórczych, kamieniołomów, odkrywek oraz naturalnych odsłoneń. Właściwe prace poszukiwawcze



Rys. 1. Miejsca poszukiwań i eksploatacji uranu w Górach Świętokrzyskich opisywane w artykule.

Fig. 1. Uranium exploration and exploitation sites in the Holy Cross Mts. described in the article.

rozwijano jedynie w miejscach, w których badania wstępne sugerowały perspektywiczne występowanie rud. Pierwsze pomiary wykonywali technicy z polowymi przenośnymi radiometrami, zapisując intensywność promieniowania gamma. Po jego analizie na wytypowane odcinki wkraczały ekipy z aparaturą do pomiaru emanacji gazowej radonu. Wszystkie wyniki były dokładnie zapisywane w odpowiednich raportach i na ich podstawie sporządzano mapy radiometryczne w skalach od 1:2000 do 1:10 000. Kolejnym etapem badań było wykonywanie rowów i wierceń poszukiwawczych oraz ich karotaż (profilowanie) gamma [3].

## Rudki (gm. Nowa Słupia)

Jedynym miejscem eksploatacji rud uranowych w Górach Świętokrzyskich była kopalnia pirytu w Rudkach k. Nowej Słupi. Złoże związane jest z uskokiem tektonicznym zwanym dyslokacją łysogórską. Ma ono formę soczewki i miejscami przyjmuje charakter żyły do 40 m grubości [4]. Okruszcowanie ma długość 600 m, a jego głębokość, wynoszącą 800 m, określono odwiertami badawczymi. Na jego wychodniach do głębokości około 20 m rozwinięta jest czapa wietrzeniowa limonitowo-hematytowa [5]. Podstawową i największą objętościowo rudą w złożu jest mieszanina siarczków żelaza  $FeS_2$ , przede wszystkim markasytu z niewielką ilością melnikowitu i pirytu – w terminologii surowcowej określanymi jako „piryt” lub „ruda pirytowa”. Występują tu również rudy żelaza: syderyt –  $FeCO_3$  i hematyt –  $Fe_2O_3$ .

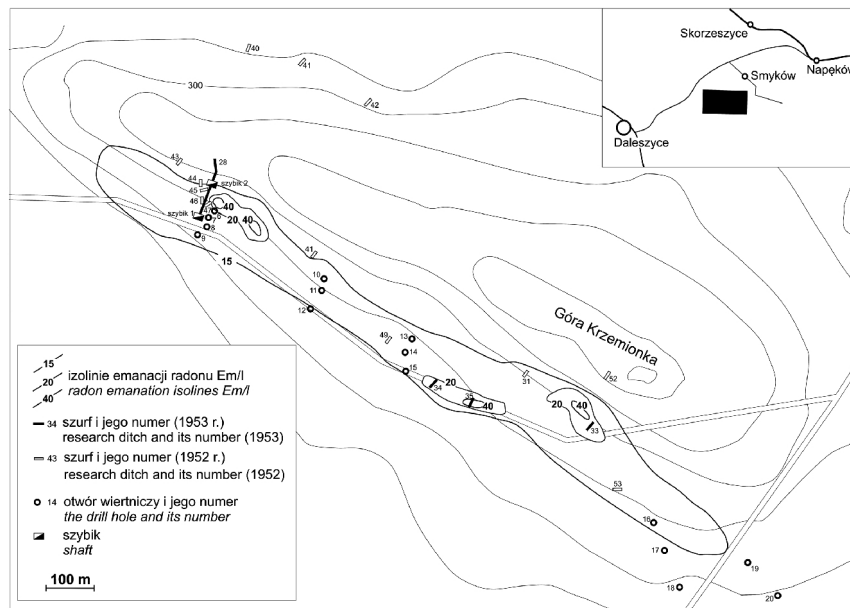
Historia eksploatacji złoża znana jest bardzo fragmentarycznie i nie była przedmiotem systematycznych badań. Już w pierwszych wiekach naszej ery istniała tu podziemna kopalnia wydobywająca rudę na potrzeby produkcji żelaza w piecach dymarskich [6]. Prawdopodobnie prowadzono tu wydobywanie we wczesnym średniowieczu i na przełomie XVI–XVII w. Do tego okresu przedmiotem eksploatacji

były wyłącznie rudy żelaza pozyskiwane z czapy wietrzeniowej.

Współczesny okres działalności górniczej rozpoczął się w 1925 r., odkrywkową eksploatacją hematytu, rozszerzając ją w latach 30. XX w. o wydobywanie syderytu. Od 1933 r. rozpoczęto systematyczną eksploatację rudy pirytowej, która stała się najważniejszym surowcem wydobywanym w kopalni, eksploatowanym systemem podziemnym do końca jej działalności w 1970 r. Wykorzystywana była do produkcji kwasu siarkowego. W złożu wykształcona była w odmianie sypkiej, ziemistej (tzw. pirit ziemisty), zawierającej około 40% siarki, lub w odmianie skalistej (tzw. pirit skalisty), zawierającej jej do 35%. Przedmiotem zainteresowania i eksploatacji były również dolomity pirytonośne mające około 20% tego pierwiastka [5]. Zakład w Rudkach dysponował urządzeniami do wzbogacania rudy: kruszarkami, sortownią, przesiewaczami i systemem flotacji, w celu uzyskania jak największej koncentracji siarki. Z biegiem czasu ruda stawała się jednak uboga, a produkcja mało opłacalna. Dodatkowo rozpoczęcie wydobywania siarki rodzimej w rejonie tarnobrzesckim spowodowało z początkiem 1971 r. likwidację nierentownej kopalni w Rudkach.

Oprócz eksploatacji „pirytu” i rud żelaza w latach 1956–1968 prowadzono tu również wydobywanie rudy uranu, które występowały w formie lokalnych impregnacji w rudzie „pirytowej”, strefach zbrekcjowania, gdzie tworzyły z markasytem spoiwo brekcji, oraz w czarnych ilach z markasytem. Stwierdzono obecność morfologicznych odmian uraninitu (blendy smolistej, ziemistej, „czerni uranowej”). Zawartość uranu dochodziła do 4% wagowych, zaś w czarnych ilach wahała się od 0,03 do 0,15% [4].

Rudę uranu w Rudkach, jako kopalinę towarzyszącą pirytom, odkryli geolodzy radzieccy w roku 1952 [2]. Jego eksploatacją zajmowały się Zakłady Przemysłowe R-1 z siedzibą w Kowarach na Dolnym Śląsku. Kopalnia w Rudkach – opisana jako „Rejon V – Góry Świętokrzys-



**Rys. 2.** Uproszczony odrys fragmentu mapy góry Krzemionka z zaznaczonymi miejscami prac ziemnych, odwiertów i wynikami pomiarów emanacji radonu, oryginalna skala 1:2000, 1953 r. (źródło: [16]).

**Fig. 2.** Simplified drawing of the map of Mount Krzemionka with marked excavations, boreholes and the results of measurements of radon emanation, original scale 1:2000, 1953 (source: [16]).

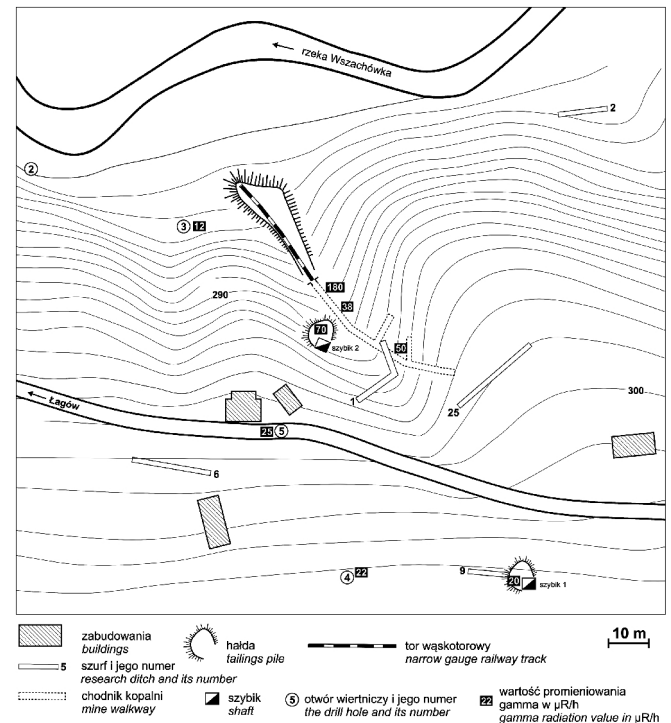
kie” tego Zakładu – od 1 czerwca 1956 r. sprzedawała i wysyłała wydobytą rudę uranową do Kowar, gdzie była sortowana, po czym wywożona do ZSRR [3]. Niewiele informacji zachowało się na temat warunków pracy górników i wpływu promieniowania na ich zdrowie. Radioaktywną kopalinę nazywano „rudą S” [2], „rudą R-1” [7] lub „gliną” [8], utrzymując w tajemnicy zawartość tego specjalnego urobku. Jej zasoby w złożu piryty nie były udokumentowane, lecz jedynie oszacowane w przybliżeniu i oparte na analizie dostępnych wyrobisk i materiałów geologicznych oraz średniej wydajności ze złoża w okresie eksploatacji [2]. Według obliczeń ekspertów radzieckich z października 1958 r. ogólne zasoby uranu w eksploatowanej części złoża wynosiły 82,5 t [2]. W latach 1956–1968 wydobyto ok. 5 tys. ton rudy, co odpowiadało ok. 3–4 t uranu [9].

Według Ewy Domaszewskiej [10] wartość promieniowania gamma osiągała na terenie kopalni „Staszic” w Rudkach wartość 1000 R/h (10 Sv/h).

Trudności ekonomiczne kopalni w Rudkach, niskie ceny oferowane przez Zakłady R-1 w Kowarach oraz duże zaangażowanie potencjału technicznego i osobowego w wydobywanie rudy uranu jako produkcji ubocznej spowodowały zaniechanie jej eksploatacji oraz zakończenie współpracy z kowarskim przedsiębiorstwem w 1968 r.

Zakłady Przemysłowe R-1 w Kowarach prowadziły w Górach Świętokrzyskich poszukiwania rudy uranu na szeroka skalę, dlatego warto również odnotować interesujące badania z innych miejsc regionu. Obejmowały one głównie trzon paleozoiczny oraz znaczną część obrzeżenia mezozoicznego. Perspektywiczne okazały się iły rudonośne na pograniczu dewonu dolnego i środkowego. Z jednostką tą związana jest większość występujących w regionie

paleozoicznych rud żelaza oraz mineralizacja kruszcowa siarczków metali kolorowych [11]. Ekipy poszukiwawcze skupiały szczególną uwagę na dawnych miejscach eksploatacji rud miedzi i żelaza, m.in. w Miedzianej Górze



**Rys. 3.** Uproszczony odrys planu poszukiwań rud uranu w Winnej k. Łagowa z zaznaczonymi lokalizacjami wyrobisk, otworami wiertniczymi i wynikami pomiarów radiometrycznych, oryginalna skala 1:500, 1955 r. (źródło: [16]).

**Fig. 3.** Simplified drawing of the plan of the uranium exploration area in Winna near Łagów with marked locations of excavations, boreholes and the results of radiometric measurements, original scale 1:500, 1955 (source: [16]).





**Rys. 4.** Radziecki szurf badawczy z 1953 r. znajdujący się na górze Krzemionce, 2019 r. (fot. P. Król).

**Fig. 4.** Soviet research ditch from 1953 located on Mount Krzemionce, 2019 (photo P. Król).

k. Kielc i Dąbrowie (obecnie dzielnica Kielc), w Winnej  
k. Łagowa, okolicach Daleszyc, we Wzdole – Kamieńcu  
k. Bodzenty na i w Miedziance k. Chęcín.

### Miedziana Góra (pow. kielecki), Dąbrowa (obecnie dzielnica Kielc)

Poszukiwania uranu prowadzono w Miedzianej Górze ze względu na obecność historycznych kopalń rud miedzi i żelaza. Funkcjonowały one od końca XVI w. do początków XX w. W Miedzianej Górze wykonano wiercenia, przeprowadzono badanie hałd oraz w mniejszym stopniu fragmentarycznie dostępnych podziemnych wyrobisk kopalni. Pobrano próbki z jednego dostępnego chodnika na głębokości 48 m. Stwierdzono, że okruszczowanie występuje w postaci bardzo cienkich, nieregularnych żyłek czerni uranowej (uraninitu) w czarnych i szarych glinach zawierających drobne wtrącenia markasytu i rzadziej chalkopirytu. Zawartość uranu zgromadzonego na starych hałdach wahała się między 0,18 a 0,20% wagowych. W czarnych glinach – według danych z wiercenia oraz opróbkowania ściany chodnika – osiągała średnią wartość 0,009%, a w poszczególnych okazach, pobranych metodą punktową, ok. 0,05% [13]. Wartości promieniowania gamma w Miedzianej Górze wyniosły od 50 do 400 R/h (0,5–4 Sv/h).



**Rys. 5.** Hałda kopalni pirytu w Winnej, 2019 r. (fot. P. Król)

**Fig. 5.** Tailings pile of the pyrite mine in Winna, 2019 (photo P. Król).

Natomiast na obszarze wsi Dąbrowa, obecnie w północno-wschodniej części Kielc, prowadzono na początku XIX w. eksploatację rud żelaza w kopalni „Włodzimierz”. Poza nimi na całym obszarze południowej części Dąbrowy znajdowały się liczne zapadliska szybowe oraz tzw. doły rudne, będące pozostałością po dawnej działalności górniczej [14]. Zakłady Przemysłowe R-1 nie prowadziły tu żadnych prac szczegółowych i rozpoznawczych. Ograniczyły się one jedynie do ogólnego zdjęcia emanacyjnego oraz pomiarów promieniowania gamma, które wyniosło od 30 do 42 R/h (0,3–0,42 Sv/h) [13].

### Sieraków, Smyków (gm. Daleszycy)

Występowanie rud uranu w okolicach Daleszyc związane jest ze złożem rud żelaza. Na ogół ma ono charakter gniazdowy, nieregularny i niestały. W znacznej mierze eksploatowane były tu rudy tlenkowe, zbudowane z żelaziaków brunatnych, a nawet hematytów. Z głębszych wyrobisk górniczych na kontakcie z dolomitami marglistymi wydobywano również syderyty [15]. Kopalnie funkcjonowały tu już od XVIII w., ale intensywną działalność górniczą prowadzono tu w XIX i na początku XX w.

Cały obszar pokryty jest dużą liczbą zagłębień i zapadlisk poszybowych. Najgłębsze szyby miały do 30 m głębokości.

Poszukiwania uranu prowadzono tu w latach 1952–1953, wykonując odwierty i szurfy badawcze. Z analizy 34 pobranych próbek materiału skalnego otrzymano średnią zawartość uranu 0,004%, maksymalnie w pojedynczych próbach do 0,03%. Wiercenia badawcze sięgały od 20 do 50 m głębokości, a radioaktywny poziom prześlędzono na długości 1000 m. Największa moc promieniowania gamma wyniosła 75 R/h (0,75 Sv/h). Emanacje radonu (z zawartością toronu od 0 do 30%) pochodziły ze starych hałd po eksploatacji rud syderytowych i wyniosły od 37–74 do 148–444 Bq<sup>1</sup> [16].

<sup>1</sup> Pomiaru emanacji radonu we wszystkich cytowanych pozycjach, oryginalnie podawano w Em/l.



## Winna (gm. Łagów)

Formacją złożową są czarne ility pirytonośne [17], z którymi związana jest mineralizacja uranowa. Piryty występują w formie rozproszonej i impregnacyjnej, a złoża są nieregularne [15]. Mineralizacja pirytowa i limonitowa została odkryta w 1937 r. Niewiele wiemy na temat wydobycia, ale podziemna kopalnia była niewielka, a złoża nie miały większego znaczenia gospodarczego. W 1952 i 1954 r. poszukiwania uranu przeprowadziły w tym rejonie Zakłady Przemysłowe R-1 w Kowarach i Państwowy Instytut Geologiczny w Warszawie [18].

Badania objęły wykonanie sztolni o długości 38 m z dwoma krótkimi bocznymi korytarzami, 5 szurfów, dwa szybiki o głębokości 12 i 13 m oraz 5 wierceń. Największe promieniowanie gamma wynosiło 180 R/h (1,8 Sv/h) [16], a emanacja radonu od 37 do 55,5 Bq, przy naturalnym jego stężeniu wynoszącym 7,4–11,1 Bq. Zawartość uranu w próbkach skalnych wyniosła od 0,02–0,03% do lokalnie 0,05% [16].

## Podsumowanie

Najbardziej interesująca jest ocena zagrożenia na obszarze nieczynnej i zrekultywowanej kopalni „pirytu” w Rudkach k. Nowej Słupi. Na powierzchni i w dostępnych fragmentach sztolni można jeszcze znaleźć okazy minerałów, ale niemożliwe jest już pozyskanie rudy uranu. Trudno jest ocenić stan zagrożenia, gdyż nie znamy dokładnych wyników pomiarów radiometrycznych, jakie prowadziły Zakłady Przemysłowe R-1 w Kowarach na terenie Rudek. Jedynie w materiale archiwalnym Ewy Domaszewskiej [10] odnotowano wartość 1000 R/h (10 Sv/h) dla kopalni „Staszic” w Rudkach. W 2019 r. na terenie dawnej kopalni przeprowadzono pomiary materiału z hałd i nie odnotowano zwiększonego promieniowania. Jediną pomocą w ocenie radioaktywności są okazy rud pirytowych z Rudek k. Nowej Słupi, znajdujące się w zbiorach Muzeum Narodowego w Kielcach. Spośród 52 próbek, w skład których wchodzi: rudy pirytowe, czarne ility, hematyty, sydereyty, limonity oraz dolomity, 6 z nich wykazało promieniowanie. Są to mieszaniny czarnych ilów i rudy pirytovej ziemistej barwy brunatnej, w formie sypkiej, z licznymi grudkami, częściowo zbrylone i z niewielką ilością pirytów skalistych. Zostały zebrane z II i III poziomu wydobywczego kopalni w 1966 r. – czyli w roku, w którym wydobywano jeszcze rudę uranową (wg danych archiwalnych pozyskano jej 296,1 t [2]). Probka zebrana na II poziomie kopalni (nr inw. MNKi/Pf/3668) ma największą wartość mocy równoważnika dawki promieniowania gamma i beta wynoszącą 11,30 Sv/h. Pozostałe okazy wykazywały promieniowanie od 0,55 do 2,40 Sv/h [10].

W latach 1964–1967 przedmiotem badań Mieczysława Szczówki [20] była m.in. strefa mineralizacji uranowej na

tym właśnie poziomie wydobywczym. Miała ona 60 m dł., przy miąższości ponad 8 m i przyjmowała formę soczewkowato-gniazdową. Rudy uranu występowały w substancjach siarczkowych o konsystencji luźniej z tkwiącymi w niej nieregularnymi bryłami markasytu od kilku do kilkunastu centymetrów. Powyższa charakterystyka odpowiada również próbkom muzealnym.

Nie wiemy, czy próbki muzealne mogły stanowić przedmiot eksploatacji, czy były pomijane ze względu na niski poziom zawartości rudy uranu. Skromnych, ale interesujących informacji, które mogą przybliżyć rozwiązanie tego problemu, dostarcza artykuł na temat antropogenicznych zmian dawki promieniowania gamma w rejonie zakładu przeróbki uranu w Kowarach [21]. W rejonie zbiornika odpadów stwierdzono istnienie trzech anomalii promieniotwórczych. Przeprowadzona analiza petrograficzna jednej z nich wykazała, że jest to składowisko nieprzeobrobionej rudy uranu, której cechy wskazują, że pochodzi ona prawdopodobnie z Rudek k. Nowej Słupi. Największa dawka promieniowania gamma wyniosła 2600 nGy/h (2,6 Sv/h), a wartość uśredniona na obszarze tej anomalii 1500 nGy/h (1,5 Sv/h) – czyli jest mniejsza od średniej mocy promieniowania muzealnych okazów z Rudek wynoszącej 2,46 Sv/h (obliczając moc równoważnika dawki tylko dla promieniowania gamma). Można zatem wyciągnąć wniosek, że muzealne okazy mogły być pełnowartościową rudą, a nie odpadem, gdyż nie przewożono by z kopalni w Rudkach do Kowar urobku nie nadającego się do wzbogacenia. Jednak z metodologicznego punktu widzenia nie można tego w pełni ocenić na podstawie aktywności promieniotwórczej pojedynczych okazów muzealnych z pomiarami prowadzonymi na większym obszarze terenu w celu wyznaczenia anomalii promieniotwórczej.

Autorzy artykułu sygnalizują jedynie potencjalne zagrożenie dla środowiska, spowodowane działalnością wydobywczą. Praca ma charakter przyczynkowy. Przeprowadzono pomiary aktywności promieniowania gamma w opisywanych miejscach eksploatacji i poszukiwania rud uranu oraz próbek muzealnych. Do tego celu wykorzystano licznik Geigera-Müllera produkcji ukraińskiej, model Terra-P ECOTEST MKS-05, mierząc promieniowanie w odległości 2 cm od próbki. Zmierzono wartości mocy równoważnika dawki promieniowania gamma ( ) oraz łącznie gamma ( ) i beta ( ). Moc równoważnika dawki naturalnego promieniowania tła wyniosła 0,12 Sv/h.

Brak zwiększonego promieniowania w obrębie hałd dawnych kopalń nie powinno uprawniać nas do zaniechania oceny stanu zagrożenia radiologicznego. Wskazane jest przeprowadzenie na tym terenie profesjonalnych badań uwzględniających również analizę wód gruntowych. Interesujących danych w tym zakresie dostarczają również szczegółowe badania próbek glebowych w kierunku obecności pierwiastków śladowych przeprowadzone na terenie

**Tabela 1.** Zestawienia pomiarów radiometrycznych przeprowadzonych w latach 50. XX w. przez Zakłady Przemysłowe R-1 w Kowarach oraz współcześnie przez autorów artykułu.**Table 1.** List of radiometric measurements made in the 1950s by Zakłady Przemysłowe R-1 in Kowary and currently by the authors of the article.

Miejsce pomiaru	Moc dawki promieniowania gamma	
	Pomiary z lat 50. XX w.	Pomiary z lat 2017–2022
Rudki	1000 $\mu\text{R/h}$ (10 $\mu\text{Sv/h}$ )	0,12 $\mu\text{Sv/h}$ (naturalne promieniowanie tła)
Miedziana Góra	50-400 $\mu\text{R/h}$ (0,5-4 $\mu\text{Sv/h}$ )	0,12 $\mu\text{Sv/h}$ (naturalne promieniowanie tła)
Dąbrowa (Kielce)	30-42 $\mu\text{R/h}$ (0,3-0,42 $\mu\text{Sv/h}$ )	brak pomiaru ze względu na zabudowę terenu
Sieraków, Smyków	50-70 $\mu\text{R/h}$ (0,5-0,7 $\mu\text{Sv/h}$ )	0,24 $\mu\text{Sv/h}$
Winna	6-180 $\mu\text{R/h}$ (0,06-1,8 $\mu\text{Sv/h}$ )	0,12 $\mu\text{Sv/h}$ (naturalne promieniowanie tła)

kopalni „Staszic” w Rudkach, wskazujące na podwyższone zawartości uranu [22].

Pomiary własne autorów zestawiono w tabeli 1 z pomiarami wykonanymi przez radzieckich badaczy w latach 50. XX w. Jedynie na górze Krzemionce, w okolicach Sierakowa i Smykowa uzyskano minimalnie większe promieniowanie od naturalnego, wynoszące 0,24 Sv/h i nie stanowiące zagrożenia dla ludności.

### Notki o autorach

**Andrzej Kasza** – geolog, elektroradiolog, speleolog prowadzący eksplorację i dokumentację jaskiń oraz dawnych kopalń kruszcowych regionu świętokrzyskiego, a także jaskiń Niecki Nidziańskiej. Prowadzi badania zimowisk nietoperzy w regionie świętokrzyskim. Członek stowarzyszenia Speleoklub Świętokrzyski i Regionalnej Rady Ochrony Przyrody w Kielcach. Pracownik Zakładu Fizyki Medycznej Świętokrzyskiego Centrum Onkologii.

**Paweł Król** – paleobiolog, informatyk, kustosz Działu Historii Naturalnej w Muzeum Narodowym w Kielcach. Specjalizuje się w badaniach skamieniałości ssaków plejstoceny. W pracy naukowej zajmuje się również historią oraz inwentaryzacją stanowisk górnictwa kruszcowego i kamiennego na Kielecczyźnie. Autor wielu wystaw o tematyce przyrodniczej, w tym geologicznej. Członek Kieleckiego Towarzystwa Naukowego.

### Literatura

- Plany prac geologiczno-poszukiwawczych, głównie ZPR-1, 1958–1962. Wstępne założenia perspektywicznego planu badań geologicznych, Archiwum Akt Nowych w Warszawie, Pełnomocnik Rządu do spraw Wykorzystania Energii Jądrowej, 1698, k. 44.
- Zduński M., Źródła do dziejów kopalnictwa uranowego w Polsce, DiG, Warszawa 2000.
- Klementowski R., W cieniu sudeckiego uranu, IPN, Wrocław 2010.
- Miecznik B. J., Strzelecki R., Wołkowiak S., Uran w Polsce – historia poszukiwań i perspektywy odkrycia złóż, „Przegląd Geologiczny”, 59, 2011, nr 10, s. 688–697.
- Rubinowski Z., Złoże pirytu w Rudkach i Wieściszowicach, (w:) Osika R. (red.) Budowa geologiczna Polski, Złoża surowców mineralnych, 6, WG, Warszawa 1987, s. 413–415.
- Bielenin K., Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich, PWN, Kielce 1992.
- Gąsior H., Historia kopalni pirytu „Staszic” w Rudkach, 1922-1971, Towarzystwo Przyjaciół Rudek, Rudki 2014.
- Uzupełnienie planu bezpiecznego prowadzenia robót górniczych na kop. Staszic w 1954-55 r. Projekt eksploatacji glin w 1955 r. przez Zakłady Przemysłowe R.1. Archiwum Dokumentacji Mierniczo-Geologicznej Wyższego Urzędu Górniczego w Katowicach. Karta informacyjna nr 40/2014, Kopalnia Staszic–482,2.
- Nieć M., Występowanie rud uranu i perspektywy ich poszukiwań w Polsce, „Polityka Energetyczna”, 12, 2009, z. 2/2, s. 435–451.
- Domaszewska E., Mineralizacja uranowa na obszarze Gór Świętokrzyskich, 1958–1959, Narodowe Archiwum Geologiczne PIG w Warszawie, 75/249, s. 52–53.
- Tarnowska M., Wstępne dane o mineralizacji warstw przejściowych emsu i eiflu w strefie Łągów-Iwaniska w Górach Świętokrzyskich, „Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego”, 39, 1969, nr 4, s. 727–731.
- Kasza A., Król P., Wyniki pomiarów radiometrycznych rudy pirytowej z kopalni „Staszic” w Rudkach k. Nowej Słupi pochodzącej ze zbiorów przyrodniczych Muzeum Narodowego w Kielcach, „Rocznik Muzeum Narodowego w Kielcach”, 33, MHKi, Kielce 2018, s. 215–223.
- Kasza A., Król P., Pabian G., Poszukiwania uranu w Miedzianej Górze i Kielcach. „Studia Muzealno-Historyczne”, MHKi, Kielce 2018, s. 11–27.
- Czarnecki J., Mapa geologiczna (odkryta) okolic Dąbrowy i Szydłówek pod Kielcami, „Prace Geologiczne”, 5, 1956, z. 1, Tablica 12.
- Rubinowski Z., Metalogeneza trzonu paleozoicznego Gór Świętokrzyskich, „Prace Instytutu Geologicznego”, 1966, s. 308–310.
- Kasza A., Król P., Poszukiwania uranu w okolicach Daleszyc i Łągowa, „Studia Muzealno-Historyczne”, 11, MHKi, Kielce 2019, s. 139–150.
- Czarnecki J., Piryt w okolicy Winnej pod Łągowem, „Prace Geologiczne”, 5, 1956, z. 1, s. 14–15.
- Uberna J., Poszukiwanie złóż i przejawów mineralizacji uranowej w Górach Świętokrzyskich, 1962, Narodowe Archiwum Geologiczne PIG w Warszawie, 4531/602, s. 14.
- Warda A., Ocena efektów rekultywacji Kopalni „Staszic” w Rudkach koło Kielc, „Geomatics and Environmental Engineering”, 1, 2007, nr 3, s. 181–194.
- Szczółka M., Mineralizacja uranowa w Rudkach k. Nowej Słupi (Góry Świętokrzyskie), „Prace Geologiczne”, 133, 1987 r.
- Ochmann A.A., Solecki A.T., Antropogeniczne zmiany mocy dawki promieniowania gamma w rejonie pouranowych instalacji przerobczych w Kowarach, „Przegląd Geologiczny”, 47, 1999, nr 8, s. 764–770.
- Gałaszka A., Migaszewski Z., Duczmal-Czernikiewicz A., Dołęgoska S., Geochemical background of potentially toxic trace elements in reclaimed soils of the abandoned pyrite-uranium mine (south-central Poland). International Journal of Environmental Science and Technology vol.13, 2016, s. 2649–2662.

# Awaria elektrowni jądrowej w Czarnobylu w dniu 26 kwietnia 1986 r.

## *Czernobyl nuclear power plant accident on April 26, 1986*

Marek Niemczyk

Wyższa Szkoła Bankowa w Gdańsku, Wydział Prawa i Administracji<sup>1</sup>

**Streszczenie:** W artykule przytoczono fragmenty pracy magisterskiej napisanej m.in. na podstawie materiałów uzyskanych podczas wizyty autora w Czarnobylu jesienią 2021 roku. Fragmenty te dotyczą genezy powstania tej elektrowni, przesłanek wyboru typu reaktora, błędów konstrukcyjnych mogących mieć kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa obiektu, zaniedbań przy prowadzeniu prac budowlanych, przebiegu awarii oraz działań podjętych w celu likwidacji jej skutków, a także – poziomów promieniowania jonizującego obecnie mierzonych na terenie elektrowni i strefy wykluczenia.

**Słowa kluczowe:** Elektrownia jądrowa, reaktory RBMK, awaria w Czarnobylu, skażenia terenu, strefa wykluczenia.

**Abstract:** *The paper quotes excerpts from the thesis written, among others based on materials obtained during the author's visit to Chernobyl in the fall of 2021. These fragments concern the genesis of this power plant, the reasons for selecting the reactor type, construction errors that may be of key importance for the safety of the facility, negligence in the course of construction works, the course of the accident and actions taken to eliminate its effects, as well as the levels of ionizing radiation currently measured in the power plant's and exclusion zone's area.*

**Keywords:** *Nuclear power plant, RBMK reactors, Chernobyl accident, land contamination, exclusion zone.*

## Wstęp

W dniu 26 kwietnia bieżącego roku upłynęło 36 lat od awarii w elektrowni jądrowej w Czarnobylu, bezsprzecznie największej ciężkiej awarii jądrowej, jeśli chodzi o zasięg skażeń promieniotwórczych terenu, które zaobserwowano w promieniu setek kilometrów od tej elektrowni. Zbierając materiały do swojej pracy magisterskiej [1], autor odwiedził w listopadzie 2021 r. obiekty elektrowni jądrowej w Czarnobylu, od wielu lat wyłączonej z eksploatacji, oraz teren i niektóre obiekty tak zwanej strefy wykluczenia, otaczającej elektrownię w promieniu 30 km. Wizyta ta stworzyła okazję do przeprowadzenia rozmów, zapoznania się z ukraińską dokumentacją oraz dokonania własnych pomiarów.

W niniejszym artykule przytoczono obszernie fragmenty wspomnianej pracy magisterskiej, dotyczące: genezy powstania elektrowni, przesłanek wyboru typu reaktora, błędów konstrukcyjnych mogących mieć kluczowe znacze-

nie dla bezpieczeństwa obiektu, zaniedbań przy prowadzeniu prac budowlanych, przebiegu awarii oraz działań podjętych w celu likwidacji jej skutków [źródłem tych informacji była literatura: 2, 3, 4, 5], a także – poziomów promieniowania jonizującego obecnie mierzonych na terenie elektrowni i strefy wykluczenia. Kolejna rocznica katastrofy w Czarnobylu to okazja do rozmowy o historii tego obiektu. W kontekście awarii nie bez znaczenia były prace budowlane, podczas których dopuszczono się nagan-nych zaniedbań. W niniejszym artykule przedstawiony zostanie też ciąg przyczynowo-skutkowy, który doprowadził do katastrofy, działania likwidacyjne skutków awarii z przytoczeniem konkretnych podejmowanych w tamtejszym czasie przedsięwzięć oraz informacja o poziomach radiacji na terenie Czarnobylskiej Strefy Wykluczenia zmierzonych przez autora w listopadzie 2021 roku.

<sup>1</sup> Tekst artykułu zawiera fragmenty pracy magisterskiej [1] napisanej pod kierunkiem prof. nadzw. WSB dr. hab. Marka Stefańskiego.



## 1. Przyczyny awarii jądrowej w Czarnobylu

Do tragedii z 26 kwietnia 1986 roku doprowadził szereg zdarzeń. Sam wybór tego typu reaktora (RBMK – Реактор Большой Мощности Канальный – reaktor kanałowy dużej mocy – moderowany grafitem, chłodzony wodą) stwarzał zagrożenie potencjalną awarią. Wyjaśnienie źródła katastrofy wymaga cofnięcia się do wydarzeń, które miały miejsce kilkanaście lat przed katastrofą w Czarnobylu [6, s. 138]. Początek budowy elektrowni to kwiecień 1970 roku, kiedy rozpoczęto prace budowlane kluczowych obiektów EJ.

Ustalenie **ostatecznej** lokalizacji elektrowni poprzedzone zostało wytypowaniem 16-tu **potencjalnych** lokalizacji w ówczesnym obwodzie kijowskim, żytomierskim oraz winnickim. Spośród wskazanych miejsc wybrano to, gdzie czynniki sprzyjające budowie były najbardziej korzystne. Pod uwagę brane były m.in. infrastruktura transportowa, dostępność zbiorników wodnych (był to bardzo ważny element ze względu na to, iż reaktory RBMK-1000 potrzebowały ogromnych ilości wody do chłodzenia rdzenia reaktora), możliwości dystrybucji energii elektrycznej do odbiorców końcowych. Ze wspomnianych 16 miejsc w lutym 1967 roku Komisja Państwowa oraz Komitet Regionalny Partii Komunistycznej w Kijowie wybrały lokalizację pod budowę elektrowni w miejscowości Kopachi, która znajdowała się w rejonie czarnobylskim należącym do obwodu kijowskiego. Łączna powierzchnia terenu, która została przeznaczona pod budowę elektrowni jądrowej, wynosiła 1676 ha obejmujących prawie 100 ha gruntów ornych, ponad 50 ha ogrodów warzywnych, 1400 ha łąk oraz ponad 100 ha lasów. Podmiotem wskazanym jako odpowiedzialny za wykonanie dokumentacji oraz projektów budowlanych Czarnobylskiej EJ był Uralski Oddział Instytutu Ministerstwa Energii ZSRR. Pod koniec maja 1968 roku [7, s. 2] podjęto decyzję o przeznaczeniu terenu pod budowę elektrowni. Na generalnego projektanta wybrano instytut „Hydroproekt”, wykonawcą został



**Rys. 1.** Fotografia ukazująca budowę pierwszego bloku energetycznego w Czarnobylu (źródło: [2, s. 13]).

**Fig. 1.** A photo showing the construction of the first Chernobyl power unit (source: [2, s. 13]).

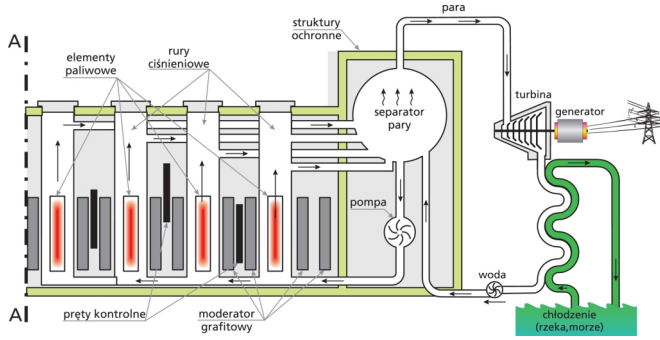
Wydział Budowy Kremenchukgesbud. Przyszłym dyrektorem elektrowni, został Wiktor Bryukhanov [2, s. 9–10], który 20 lat później odegrał istotną rolę po katastrofie bloku numer 4.

Warto również wspomnieć, iż od początku budowy Czarnobylskiej EJ zarówno obiekt, jak i osoby biorące udział w tym przedsięwzięciu oraz późniejszej eksploatacji były pod stałą obserwacją KGB (Комитет Государственной Безопасности – radziecki Komitet Bezpieczeństwa Państwowego). Funkcjonariusze KGB sprawdzali m.in. czy wśród zaangażowanych w prace w rejonie Czarnobyla nie ma osób mogących stanowić zagrożenie wywiadowcze lub inne mogące godzić w sprawy partii komunistycznej. Pośród pracowników elektrowni, zarówno inżynierów jak i robotników, szukano osób, które określano mianem „niewiarygodnego elementu”. Chodziło głównie pracowników narodowości niemieckiej lub chińskiej skazanych za szczególne przestępstwa lub działalność sprzeczną z ideologią partii komunistycznej.

Zarówno początek prac związanych z uruchomieniem Czarnobylskiej EJ, jak również następne miesiące i lata budowy przynosiły niedociągnięcia, niedopatrzienia oraz braki, które były przez KGB na bieżąco skrupulatnie notowywane i przekazywane przedstawicielom wysokich władz w partii [2, s. 11–12]. Mimo informacji o niewłaściwym prowadzeniu budowy, nieprawidłowościach w infrastrukturze, która była tworzona, nie doszło do przerwania prac ani do jakiegokolwiek kontroli jakości czy bezpieczeństwa ze strony władz radzieckich. W procesie powstawania elektrowni w Czarnobylu najprawdopodobniej priorytetem było utrzymanie tempa budowy, kosztem zaniedbania szeregu wymogów bezpieczeństwa mających zapewnić by obiekt nie stanowił zagrożenia. Warto nadmienić, że reaktory budowane w Czarnobylu stanowiły obiekty podwójnego zastosowania. Mogły bowiem w każdej chwili zostać „przestawione” z zadania generowania energii elektrycznej na zadanie wytwarzania plutonu o jakości militarnej, który mógłby bez najmniejszego problemu zostać użyty w celach wojskowych. Warto również zauważyć, że brak reakcji władz radzieckich na zauważone uchybienia mógł być spowodowany tym, że o faktycznym przeznaczeniu reaktorów wiedziały tylko nieliczne osoby. Nawet operatorzy reaktorów znajdujących się na terenie Czarnobylskiej EJ nie wiedzieli, z jakim obiektem w rzeczywistości mają do czynienia. Projekt budowy elektrowni był bowiem ściśle tajny, a o jego prawdziwych założeniach, czyli możliwości wykorzystania do celów militarnych, wiedziały tylko najważniejsze osoby w Związku Radzieckim [8, s. 6]. Reakcje ze strony władz lub innych instytucji kontrolnych mogłyby doprowadzić do ujawnienia podwójnego przeznaczenia reaktorów, czego chciano uniknąć.

Główną, a zarazem najważniejszą dla władz radzieckich cechą reaktora RBMK-1000 była konstrukcja kanałów paliwowych reaktora, które były odseparowane od siebie, tak, że każdy kanał stanowił oddzielny segment. Segment





Rys. 2. Schemat budowy reaktora typu RBMK-1000 (źródło: [3]).

Fig. 2. Diagram of the construction of the RBMK-1000 type reactor (source: [3]).

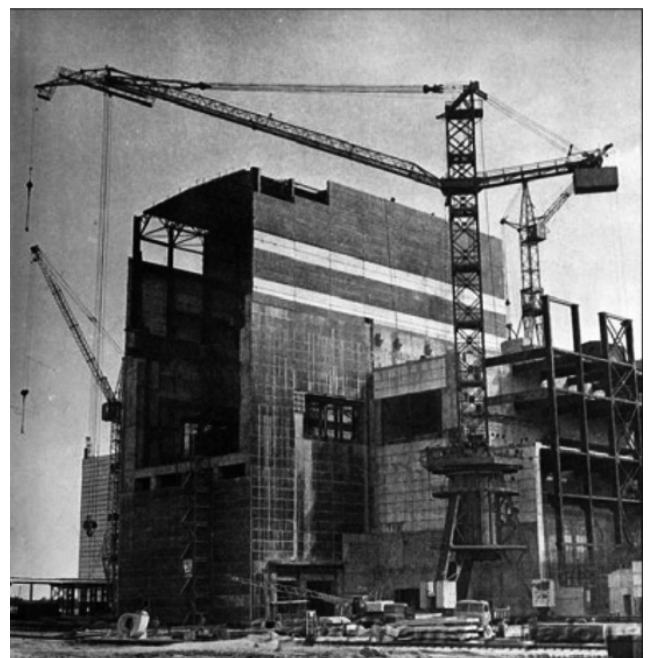
ten można było bez jakichkolwiek problemów przeladować, „wymienić” znajdujący się w nim element paliwowy, nie zakłócając przy tym pracy pozostałych rur ciśnieniowych, czyli kanałów paliwowych. Stworzenie możliwości swobodnej wymiany elementów paliwowych, miało przede wszystkim sprzyjać celom militarnym. Otóż podczas eksploatacji paliwa jądrowego, czyli podczas pracy reaktora, w wyniku przemian jądrowych wewnątrz niego dochodzi do wytworzenia izotopu plutonu-239, który ma szerokie zastosowanie w produkcji broni jądrowej [3]. Konstrukcja reaktora (pokazana schematycznie na rysunku 2) pozwalała na usunięcie z reaktora elementu paliwowego, w którym stężenie plutonu-239 osiągnęło odpowiedni poziom oraz na wprowadzenie nowego bez zatrzymywania pracy całego reaktora. Taki proces, prowadzony w dużym reaktorze pozwalał na uzyskiwanie odpowiednio dużych ilości plutonu o przeznaczeniu wojskowym.

Powróćmy jednak do historycznego ciągu zdarzeń zapoczątkowanego rozpoczęciem prac przy budowie elektrowni. Pierwsze raporty wskazujące na błędy podczas prac budowlanych sięgają kwietnia 1973 roku. Mowa w nich na przykład o niedopatrzeniach skutkujących pęknięciami betonowych fundamentów, co spowodowane było nieprawidłową gęstością betonu. Kolejne uchybienia dotyczyły rozbieżności między materiałami, środkami oraz technologiami ujętymi w projekcie, a tymi, które zostały faktycznie zastosowane i wpływały na wytrzymałości konstrukcji. Jednym z naruszeń, które mogły w znacznym stopniu wpłynąć na bezpieczeństwo, było użycie zbrojenia, zamontowanego w podstawie płyty znajdującej się pod reaktorem, o wytrzymałości  $2700 \text{ kg/cm}^2$ . Wedle projektu podczas budowy wspomnianej konstrukcji podpierającej miało zostać zastosowane zbrojenie o wytrzymałości na poziomie sięgającym blisko  $3400 \text{ kg/cm}^2$ , co oznacza różnicę na niekorzyść sięgającą  $700 \text{ kg/cm}^2$ , stanowiącą zatem istotną wadę konstrukcyjną [9, s. 376]. Inne błędy w procesie budowy elektrowni dotyczyły wad technologicznych, między innymi w zbiornikach na odpady promieniotwórcze, co mogło doprowadzić do ich rozszczelnienia, a w konsekwencji – nawet do znacznego skażenia wód gruntowych. W raportach jest też mowa o nieodpowiednich

jakościowo spawach oraz łączeniach zaworów biorących bezpośredni udział w pracy reaktora, oraz o braku określenia elementów infrastruktury o znaczeniu krytycznym, która musiałaby spełniać określone kryteria dla jej prawidłowego funkcjonowania. Dotyczyło to m.in. podstacji paliwowej, która miała za zadanie w odpowiedni sposób odbierać ze środków transportu oraz przechowywać i przekazywać do eksploatacji paliwo jądrowe [10, s. 108]. Według raportów KGB pierwsze dostawy świeżego paliwa musiały zostać przetrzymane w środkach transportu przez kilka dni, potrzebnych do stworzenia warunków spełniających minimalne normy bezpieczeństwa dla czynności prowadzonych z materiałami o tak istotnym znaczeniu [2, s. 35–42].

Poważnym niedopatrzaniem był również brak elementów ogrodzenia, co dawało możliwość wejścia na teren budowy elektrowni osób nieupoważnionych i często skutkowało kradzieżami oraz szabrownictwem elementów przeznaczonych do wykonywania wszelkich niezbędnych prac.

Jednak poza wszelkimi uchybieniami, które miały miejsce podczas prac przy budowie elektrowni w Czarnobylu, błędami projektowymi, które mogły potencjalnie doprowadzić do awarii, jedną z największych wad, a zarazem jedną z dwóch głównych przyczyn katastrofy w kwietniu 1986 roku były przyjęte rozwiązania konstrukcyjne oraz cechy funkcjonowania reaktorów typu RBMK. Istotne jest wyjaśnienie, jakie cechy reaktorów RBMK sprawiły, iż mogły one stwarzać katastrofalne zagrożenie, ponieważ dopiero pełne zrozumienie ich wad oraz popełnionych błędów pozwoliło rzucić światło na ciąg przyczynowo-skutkowy największej awarii jądrowej w historii.



Rys. 3. Proces budowy bloku reaktora numer 1 w Czarnobylskiej EJ (źródło: [2, s. 34]).

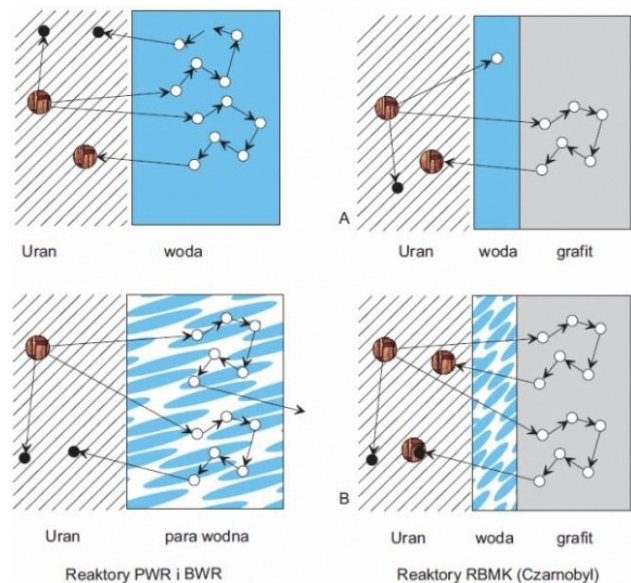
Fig. 3. The construction process of reactor unit no. 1 at the Chernobyl NPP (source: [2, s. 34]).

Reaktory typu RBMK-1000, które były eksploatowane w elektrowni jądrowej w Czarnobylu, stanowiły potencjalnie duże zagrożenie od początków swojego funkcjonowania. Otóż cechowały się one tzw. dodatnim współczynnikiem reaktywności przestrzeni parowych. W odniesieniu do reaktorów jądrowych oznacza to samoczynny wzrost mocy reaktora w przypadku zwiększenia się temperatury rdzenia. Zjawiskiem poprawnym, a zarazem odwrotnym do przedstawionego jest ujemny współczynnik reaktywności, powodujący zmniejszenie mocy wytwarzanej przez reakcję łańcuchową w przypadku zwiększania się temperatury wewnątrz reaktora. Należy jednak wyjaśnić, czym różnią się oba wspomniane zjawiska, w jaki sposób powstają oraz dlaczego jedno z nich doprowadziło do katastrofy w 1986 roku. Dodatni współczynnik reaktywności, który cechował reaktory w Czarnobylu, wynikał przede wszystkim z ich konstrukcji, a konkretniej z rodzaju zastosowanego moderatora, czyli substancji, która spowalnia neutrony do prędkości pozwalających na zachodzenie reakcji rozszczepienia paliwa jądrowego i co za tym idzie, do wykorzystania wytwarzanej energii. Dzieje się tak, ponieważ pierwotnie neutrony powstające w wyniku rozszczepienia jąder uranu (znajdujących się w paliwie) posiadają zbyt duże prędkości, co powoduje, iż przechodzą one przez paliwo jądrowe, nie podtrzymując wspomnianej wyżej reakcji rozszczepienia. Zastosowanie moderatora pozwala na spowolnienie neutronów do prędkości, przy których mogą one wejść w reakcje z atomami paliwa (uranu-235) doprowadzając do ich rozszczepienia. W Czarnobylu wspomnianą substancją moderującą był grafit, a woda znajdująca się pomiędzy kanałami paliwowymi służyła jedynie do odprowadzania ciepła<sup>2</sup>. Dlaczego taki układ funkcjonowania jest tak bardzo niebezpieczny? Otóż w standardowych reaktorach wodnych ciśnieniowych (PWR) i wodnych wrzących (BWR) moderatorem jest woda. W ich schemacie funkcjonowania zwiększenie temperatury rdzenia powoduje zwiększenie parowania wody i zmniejszania się jej gęstości, co prowadzi do osłabienia spowalniania neutronów, a co za tym idzie do obniżenia zdolności rozszczepiania i w efekcie do zmniejszenia mocy reaktora, ponieważ woda zamieniająca się w parę traci swoje właściwości moderujące. Opisane zjawisko nazywane jest ujemnym współczynnikiem reaktywności (zwiększenie temperatury rdzenia powoduje zmniejszenie mocy reaktora). Ponadto poza efektem spowalniania neutronów w wodzie dochodzi do pochłaniania pewnej ich części, a to dodatkowo wpływa na obniżenie liczby neutronów zdolnych do wywołania reakcji rozszczepienia.

Natomiast, jak wspomniano wyżej, w reaktorach czarnobylskich oraz we wszystkich im podobnych typu RBMK, znajdujących się wówczas wyłącznie na terenie byłego ZSRR, woda służyła jedynie do odprowadzania

ciepła, więc jej parowanie na skutek zwiększenia temperatury doprowadzało do zwiększenia mocy, ponieważ moderatorem był grafit. Tymczasem zamiana wody w parę prowadziła do „ułatwienia” w dotarciu rozpędzonych neutronów uranu do moderatora, a co za tym idzie, dochodziło do większej ilości rozszczepień atomów uranu-235 w paliwie. W prostym ujęciu opisywanego zjawiska zamiana wody w parę była swego rodzaju usunięciem pewnego zabezpieczenia, jakim było pochłanianie pewnej ilości neutronów przez wodę, mimo że było jej znacznie mniej niż w reaktorach PWR i BWR, w których dawała możliwość lepszej kontroli nad tymi reaktorami [12].

Drugim błędem o krytycznym znaczeniu dla bezpieczeństwa reaktorów eksploatowanych w Czarnobylskiej EJ była konstrukcja i sposób funkcjonowania systemu prętów bezpieczeństwa, które w razie zagrożenia awaryjnie miały zostać opuszczone do środka rdzenia, powodując jego awaryjnie wyłączenie. Użycie tego systemu wywoływało jednak efekt odwrotny do pierwotnie zakładanego. Błędna konstrukcja prętów bezpieczeństwa, których zakończenia wykonane były z grafitu, powodowała dodatkowy, gwałtowny wzrost mocy oraz temperatury w początkowej fazie wprowadzania ich do wnętrza rdzenia [8, s. 7].



**Rys. 4.** Reakcje zachodzące w reaktorach PWR i BWR oraz w reaktorach RBMK w przypadku zwiększenia temperatury (dodatni i ujemny współczynnik reaktywności) (źródło: [12]).

**Fig. 4.** Reactions taking place in PWR and BWR reactors and in RBMK reactors in case of temperature increase (positive and negative reactivity coefficient) (source: [12]).

Do tragedii nie doprowadziły jednak tylko niekorzystne cechy tego typu reaktora i wadliwe rozwiązanie projektowe, ale również błędne oraz obiektywnie niebezpieczne decyzje osób odpowiedzialnych za jego pracę. Reaktor numer 4 miał zostać poddany eksperymentowi mającemu

<sup>2</sup> Так у тексті. Йдеться про Міністерство середнього машинобудування СРСР. Заводами-ви робниками основного обладнання реактора RBMK були Горьковський машинобудівний за вод та Ленінградський завод, Більшовик., Див. докладніше: История атомной энергетики Советского Союза и России / под редакцией В.А. Сидоренко. Выпуск 3. История RBMK. М.: ИЗДАТ, 2003, s. 62 [11].



na celu zweryfikować, czy generatory pracujące w bloku są w stanie zapewnić niezbędne ilości energii elektrycznej wytwarzanej siłą bezwładności na potrzeby funkcjonowania urządzeń i systemów reaktora w przypadku nagłego zaniku podstawowego źródła zasilania bloku elektrowni. W przypadku takiego zaniku zapasowym źródłem zasilania urządzeń i systemów reaktora były prądnice napędzane silnikami Diesla, jednak osiągały one odpowiednią moc dopiero po upływie około 30–60 sekund. To właśnie w czasie tych kilkudziesięciu sekund generatory miały podtrzymać sprawność systemów w bloku energetycznym z wykorzystaniem energii elektrycznej wytwarzanej na biegu jałowym [13, s. 4]. Przygotowania do przeprowadzenia eksperymentu zostały zainicjowane przez operatorów, którzy pracowali na „porannej zmianie”. W późnych godzinach wieczornych zakończyli oni pracę i przeprowadzenie eksperymentu zostało przekazane zmianie nocnej, czyli obecnej w pracy podczas awarii. Już na tym etapie wystąpiły dwa istotne błędy. Do eksperymentu został prawidłowo przygotowany zespół operatorów wykonujących pracę w ciągu dnia. Ich koledzy, którzy przejęli obsługę reaktora nocą, nie posiadali dostatecznej wiedzy na temat doświadczenia, które mają przeprowadzić, nie byli w tym kierunku przeszkoleni oraz przede wszystkim nie byli świadomi zagrożeń, jakie może spowodować wprowadzenie reaktora jądrowego w stan awaryjny. Drugim z błędów było doprowadzenie do pracy reaktora na znacznie obniżonej mocy przez wiele godzin (eksperyment miał zostać przeprowadzony 25 kwietnia 1986 roku przez zmianę dzienną, jednak dyspozytor sieci energetycznej nie zezwolił na odłączenie reaktora ze względu na zapotrzebowanie energetyczne). Reaktor pracował zatem przez kilkanaście godzin z mocą powodującą wystąpienie zjawiska, jakim jest tzw. zatrucie ksenonowe. Zjawisko to polega na nagromadzeniu się izotopu ksenonu-135 wewnątrz rdzenia powodującego zwiększone wychwytywanie neutronów, które z kolei odpowiadają za reakcję rozszczepienia paliwa jądrowego. Konsekwencją wystąpienia zjawiska zatrucia ksenonem jest gwałtowny spadek mocy reaktora. Jeżeli zmiana, która przejęła kontrolę nad reaktorem w nocy z 25 na 26 kwietnia, utrzymałaby obniżoną moc jego pracy, mogłoby dojść nawet do jego samoczynnego zatrzymania, a operatorzy, którzy wykonywali swoje obowiązki w dyspozytorni bloku czwartego w noc katastrofy, wiedzieli, że taka sytuacja w żadnym wypadku nie może mieć miejsca. Konieczne było więc zwiększenie mocy reaktora do wartości minimalnej do przeprowadzenia eksperymentu. W tym celu operatorzy wysuwali z rdzenia pręty bezpieczeństwa do momentu, aż większa ich liczba znajdowała się w pozycji nad rdzeniem. Było to usunięcie jednego z dwóch kluczowych elementów bezpieczeństwa reaktora. Pierwszy z nich, czyli układ awaryjnego chłodzenia rdzenia, wyłączyła o godzinie 13:00 25 kwietnia dzienna zmiana operatorów. Wyłączono również niektóre tory systemu zabezpieczeń w dużej mierze odpowiedzialne za prawidłową,

bezpieczną pracę reaktora i jego bezpieczne wyłączenie. Był to chociażby tor awaryjnego wyłączenia reaktora od wahań poziomu wody, oraz tor awaryjnego wyłączenia w przypadku zaniku zasilania elektrycznego. Wyłączono także system awaryjnego układu zalewania rdzenia. Należy więc zauważyć, że reaktor został pozbawiony przez operatorów obu zmian wszystkich zabezpieczeń, które miały chronić reaktor przed tym, do czego doszło o godzinie 01:24 [14].

Do tej godziny sukcesywnie popełniono szereg zaniechań polityki i procedur bezpieczeństwa reaktorów jądrowych. Operatorzy, mimo iż mogli być świadomi konsekwencji swoich działań, wykonywali czynności, które z każdym kolejnym krokiem wprowadzały reaktor w stan coraz bardziej niestabilny. Finalnie na minutę przed katastrofą jeden z głównych operatorów rozpoczął procedurę AZ-5. W reaktorach RBMK jest to procedura awaryjnego zrzutu prętów bezpieczeństwa do rdzenia. Po rozpoczęciu procedury wszystkie pręty bezpieczeństwa, które zostały przez operatorów wcześniej usunięte z rdzenia, aby zwiększyć moc, zostały jednocześnie wprowadzone z powrotem do niego. Wyżej opisano działanie prętów bezpieczeństwa w reaktorach RBMK oraz wady w ich konstrukcji. Właśnie te wady, w momencie rozpoczęcia awaryjnej procedury wprowadzania prętów do rdzenia, dały o sobie znać. Operator, który zainicjował AZ-5, był całkowicie nieświadomy, że system mający działać jak hamulec doprowadzi do stanu reaktora, w którym nie ma już odwrotu przed katastrofą.

Za przyczyny awarii w Czarnobylu z 26 kwietnia 1986 roku można uznać całą gamę czynników, od wad projektowych oraz wykonawczych powstałych na etapie budowy począwszy, poprzez wadliwość samego reaktora typu RBMK, na błędach popełnionych przez operatorów kończąc. Wszystkie z tych czynników były katastrofalne w skutkach, kiedy w noc tragedii wszystkie jednocześnie dały o sobie znać. Należy zwrócić uwagę na skrajnie nieodpowiedzialne omijanie zasad bezpieczeństwa w obchodzeniu się z tak potężną siłą, jaką jest energia jądrowa. Złamanie wszystkich procedur bezpieczeństwa w noc katastrofy świadczy nie tylko o głębokiej niekompetencji, ale również o bezmyślnym nacisku władz, które koniecznie chciały przeprowadzić test reaktora 26 kwietnia. Interpretując szereg przyczyn przytoczonej katastrofy, należy również zauważyć, iż była ona jak najbardziej możliwa do uniknięcia, ponieważ potencjalnie tragiczne w skutkach czynniki zaczęły się pojawiać na długo przed samą awarią.

## 2. Wydarzenia po awarii oraz utworzenie Czarnobylskiej Strefy Wykluczenia

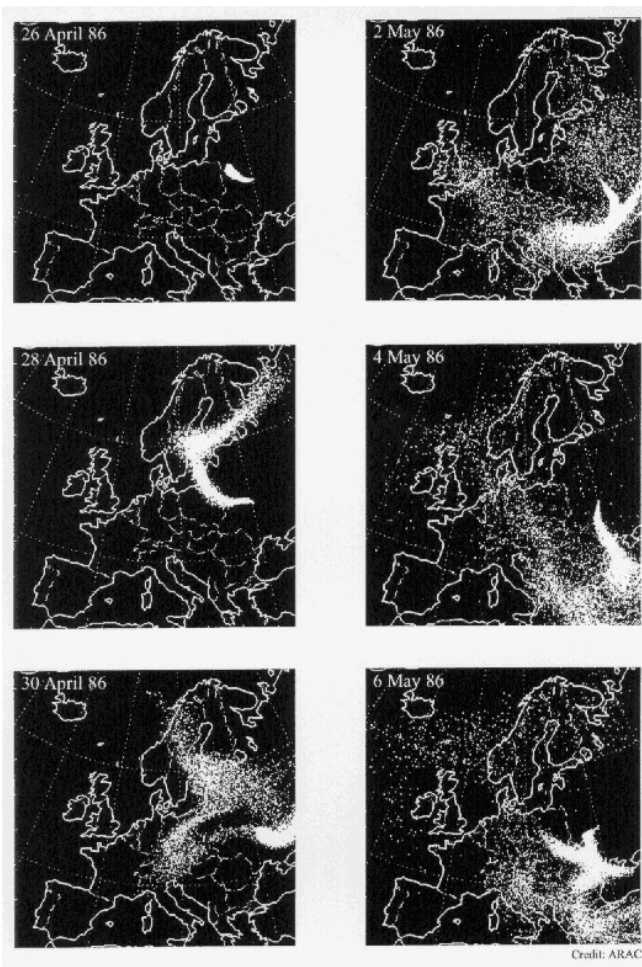
Kolejne godziny, dni i miesiące po awarii utwierdziły ludność w przekonaniu, że to nie eksplozja reaktora była najgorszym, co mogło nastąpić. Gwałtowny wzrost mocy doprowadził w ułamku sekundy do wybuchu, który zniszczył górną betonową pokrywę i dach budynku reak-

tora, oraz do pożaru rdzenia reaktora, zawierającego ogromne ilości grafitu. Grafit płonął przez wiele dni, powodując unoszenie na znaczną wysokość silnie promieniotwórczych produktów rozszczepienia, ze zniszczonego rdzenia reaktora bez jakichkolwiek przeszkód bezpośrednio do atmosfery. Było to początkiem trwającej wiele dni emisji do atmosfery silnie radioaktywnych pyłów, które wraz z masami powietrza przemieszczały się po całej Europie, pozostawiając największy opad promieniotwórczy na terenie dzisiejszej Ukrainy, Białorusi i Rosji [15]. Na miejsce awarii tuż po wybuchu zostały skierowane wszystkie pobliskie jednostki straży pożarnej, które, jak wynika z oryginalnych nagrań rozmów dyspozytorni, nie miały pojęcia o skali zagrożenia. Wszystkie wydarzenia, począwszy od 26 kwietnia 1986 r., były starannie utajniane, tak aby informacja o awarii nie wydostała się poza teren Związku Radzieckiego. Dlatego, dopóki było to możliwe, utrzymywano, iż doszło do najzwyczajszego pożaru dachu bloku reaktora. Tymczasem należało jak najszybciej uświadomić ludność i służby o faktycznym stanie rzeczy i skali zagrożenia. Kiedy 48 godzin od wybuchu wykryto podniesione poziomy promieniowania na stacji Forsmark w Szwecji, władze radzieckie poinformowały świat o kata-

strofie, co tym samym oznaczało rozpoczęcie działań w celu niwelowania skutków awarii [16]. W pierwszej kolejności gaszono pożar tłący się wewnątrz reaktora. W tym celu zrzucano z helikopterów do zniszczonego reaktora worki z piaskiem, borem oraz ołowiem w celu zasypania źródła pożaru, a tym samym zatrzymania emisji radioaktywnych pierwiastków do atmosfery. Według oficjalnych statystyk wykonano łącznie z użyciem 30 śmigłowców około 1800 lotów, podczas których zrzucano do reaktora ponad 1000 ton materiałów, co miało na celu, oprócz stłumienia pożaru, zamknąć zgłiszcza reaktora pod tymże materiałem oraz zahamować ewentualną reakcję łańcuchową w paliwie jądrowym [17]. Jeden pilot potrafił wykonywać nawet do 33 przelotów dziennie, poddając się ekspozycji na bardzo wysokie dawki promieniowania, które często wywoływały podstawowe lub silnie zaawansowane objawy choroby popromiennej.

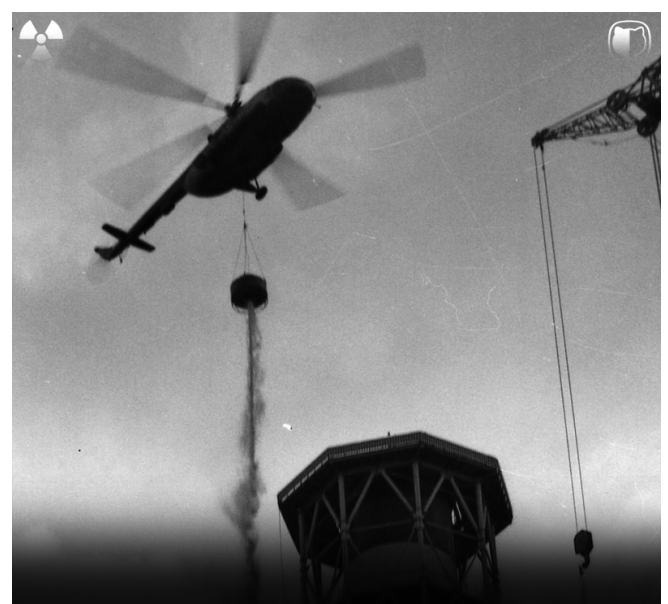
Kolejnym ważnym krokiem była ewakuacja ludności. Wysiedlono dziesiątki tysięcy ludzi, w tym znajdującą się w pobliżu miejscowość Prypeć, którą w chwili katastrofy zamieszkiwało 50 tysięcy osób. Wsiedlenie ludności było kluczowym elementem w celu zniwelowania liczby ofiar, zarówno tych bezpośrednich, jak i tych, które z biegiem lat zachorowałyby na poważne schorzenia spowodowane ekspozycją na wysokie dawki promieniowania. Mieszkańcy wszystkich ewakuowanych miejscowości zostawili w domach cały swój dobytek, który do dziś znajduje się w niekniętym stanie. Nikt spośród ewakuowanych mieszkańców nigdy nie wrócił do swojego domu.

Ze względu na radioaktywną lawę, która przepalała się przez betonowe fundamenty reaktora, co generowało ryzyko przedostania się silnie promieniotwórczych radionuklidów do gleby i skażenie jej w promieniu nawet setek



**Rys. 5.** Przemieszczanie się radioaktywnej chmury w ciągu pierwszych dni po awarii (źródło: [15]).

**Fig. 5.** The movement of the radioactive cloud over preliminary few days after accident (source: [15]).



**Rys. 6.** Helikopter zrzucający piasek i ołów do wnętrza reaktora (źródło: [18]).

**Fig. 6.** A helicopter dropping sand and lead inside the reactor (source: [18]).





**Rys. 7.** Prypeć – Dom kultury „Energetyk” (źródło: materiał własny).

**Fig. 7.** Pripjat – „Energetyk” Community Center (source: own material).



**Rys. 8.** Prypeć – widok na elektrownię z dachu bloku mieszkalnego, 2021 (źródło: materiał własny).

**Fig. 8.** Pripjat – View of the power plant from the roof of an apartment block in 2021 (source: own material).

kilometrów, konieczne było wykonanie pod zniszczonym reaktorem komory betonowej. Zadania podjęli się górnicy, którzy wykopali pod reaktorem ową komorę, a następnie wypełnili ją betonem [19, s. 102–103]. Obecnie zastygła lava znajdująca się pod reaktorem wciąż wydzielą ciepło oraz silnie podwyższone wartości promieniowania jonizującego, które w 2010 roku wskazywały wartości sięgające nawet 12 Sv/h, przy czym ekspozycja na wartości sięgające 4 Sv/h powoduje objawy silnej choroby popromiennej, a nawet śmierć [20].

Oprócz ewakuacji ludności, ugaszenia pożaru reaktora, zabezpieczenia jego dna podjęto szereg kompleksowych i długofalowych działań mających na celu eliminację wszelkich możliwych źródeł promieniowania w obrębie miejsca katastrofy [21, s. 123]. Potocznie eliminację jakichkolwiek substancji stwarzających zagrożenie radiacyjne, określa się mianem „dezaktywacji”. Poprzez dezaktywację rozumie się wszelkie czynności mogące doprowadzić do zatrzyma-



**Rys. 9.** Zastygnięta radioaktywna lava pod powierzchnią reaktora nazywana „Stopą słonia” (źródło: [20]).

**Fig. 9.** Frozen radioactive lava under the reactor surface called „Elephant’s foot” (source: [20]).

nia emisji promieniowania przez daną substancję. Dezaktywacją może być zakopanie takiej substancji w ziemi, a także najzwyczajsze zmycie jej odczynnikami chemicznymi bądź wodą. Zrozumienie pojęcia dezaktywacji jest bardzo ważne, ponieważ w procesie neutralizacji produktów promieniotwórczych po katastrofie w Czarnobylu użyto prawdopodobnie wszystkich możliwych, istniejących w tamtejszym okresie sposobów. Pierwszym z ważniejszych zadań w akcji „likwidatorów” było usunięcie radioaktywnych odłamków z dachu reaktora numer 3 i zrzucenie ich do wnętrza ruin reaktora numer 4. Pierwotnie zadanie to miały wykonywać roboty, jednak ekspozycja na promieniowanie na dachu była tak wysoka, że dochodziło do przepalania się instalacji elektrycznej tych robotów. Dlatego do tego zadania zaangażowano ludzi, którzy mogli „bezawaryjnie” pracować w obszarze dachu reaktora. Wyznaczono kilkanaście zmian składających się z żołnierzy odzianych w ołowiane kombinezony, które miały chronić ich przed promieniowaniem. Każda z grup mogła przebywać wśród promieniotwórczego gruzowiska maksymalnie 40 sekund. Po tym czasie musiała natychmiastowo ewakuować się z powrotem do środka budynku. Czterdzieści sekund to był według założeń czas, podczas którego ekspozycja na promieniowanie była na tyle tolerancyjna, iż dawała likwidatorom duże szanse na przeżycie lub narażenie się na lekkie objawy choroby popromiennej. W wielu jednak przypadkach wśród osób oczyszczających dach bloku numer 3 dochodziło w późniejszym czasie do przewlekłych postaci choroby popromiennej lub chorób nowotworowych.

Kiedy dach bloku numer 3 został oczyszczony, a wewnątrz ruin zniszczonego reaktora numer 4 zasypane tysiącami ton piasku, boru i ołowiu, uznano, że sytuację na terenie elektrowni udało się opanować, jednak teren położony w promieniu wielu kilometrów od obiektu również wymagał specjalistycznych działań ze względu na silne skażenie promieniotwórcze, którym został dotknięty. Z tego też powodu rozpoczęto dekontaminację pobliskich





**Rys. 10.** Robot, który pracował w silnie skażonej strefie przez dwa miesiące (cały okres likwidacji) (źródło: materiał własny).

**Fig. 10.** Robot that worked in a highly contaminated zone for two months (the entire decommissioning period) (source: own material).



**Rys. 11.** Jeden z pierwszych robotów, które pojawiły się na miejscu katastrofy (źródło: materiał własny).

**Fig. 11.** One of the first robots that appeared at the crash site (source: own material).

miejsowości oraz terenów przyległych, jak lasy, pola itd. W większości przypadków dekontaminacja w miastach, jak np. Prypeć, polegała na polewaniu wodą ulic, budynków, elementów infrastruktury miejskiej. Prowadzono również dezaktywację pierwiastków radioaktywnych wewnątrz zabudowań, tj. mieszkań, szkół, hoteli, sklepów oraz obiektów kultury. Wiele z mniejszych wsi i osad nie zostało potraktowane w tak łagodny sposób. Często praktyką w stosunku do bardzo małych miejscowości było burzenie zabudowań, wykopywanie ogromnego dołu w ziemi, umiejscowienie pozostałości po budynkach w tymże dole i zasypianie go ziemią. W taki sposób zniknęła chociażby miejscowość Kopaczi, którą mija się, jadąc do Prypeci. Dzisiaj istnieje tam tylko las.

Wiele odłamków porzucanych po eksplozji oraz inne skażone obiekty, jak np. ubrania, zakopano w lesie znajdującym się w pobliżu miejsca katastrofy. Las ten nazywany

jest „czerwonym lasem”. Do dzisiaj jest on miejscem, do którego wpuszczani legalnie są tylko pracownicy strefy, naukowcy oraz dozymetryści, ponieważ pomiary promieniowania wciąż wskazują tam niepokojąco wysokie wartości, które 14 listopada 2021 roku wskazywały przy samej granicy lasu 12 mikrosiwertów na godzinę, co jest przekroczeniem umownej wartości zwanej „normą” o 40 razy. Tak wysokie wartości są skutkiem tego, iż wśród zakopanych gruzowisk często znajdowały się silnie promieniotwórcze szczątki elementów paliwowych lub grafitu otaczającego kasety paliwowe wewnątrz reaktora.

Inne zastosowane działania były często kontrowersyjne. Jednym z nich była całkowita eliminacja zwierząt znajdujących się w strefie wokół Czarnobyla. Psy, koty, zwierzęta gospodarcze. Wszystkie te stworzenia były zabijane przez specjalnie wyznaczone do tego brygady. Jak później tłumaczono, eliminacja zwierząt została wdrożona ze względu na to, że duże ilości radioaktywnych pierwiast-



**Rys. 12.** Nienaruszony blok grafitowy, który umieszczony był wewnątrz reaktora (źródło: materiał własny).



**Rys. 13.** Znak ostrzegawczy na granicy wejścia do „czerwonego lasu” (źródło: materiał własny).

**Fig. 13.** Warning sign at the border of the entrance to the „Red Forest” (source: own material).



ków mogą się osadzać w sierści, więc zdecydowano o eliminacji wszelkich zwierząt, aby nie wydostały się one poza strefę, roznosząc tym samym radionuklidy.

Całość przedstawionych działań składała się na główne elementy akcji „likwidatorów z Czarnobyla” i przyniosła oczekiwane efekty, ponieważ zneutralizowano z otoczenia większość źródeł promieniowania. Pozostały jednak dwa poważne problemy do rozwiązania. Jak zabezpieczyć zniszczony reaktor oraz co zrobić z pojazdami, które brały udział w akcji dekontaminacji, ponieważ nie mogły one opuścić już strefy. W przypadku pierwszego problemu postanowiono o przykryciu zniszczonego bloku reaktora budowlą składającą się z płyt betonowych osiagających pięć metrów grubości. Budowlę nazwano sarkofagiem, a jej żywotność wyliczono na 30 lat. Konstrukcja spełniła swoje zadanie, ponieważ wytrzymała 33 lata, do momentu oddania do użytku nowej budowli o nazwie „nowa arka” mającej zakrywać zniszczony reaktor przez kolejne sto lat. Budowla jest jednocześnie największym obiektem ruchomym na świecie.



**Rys. 14.** „Nowa Arka” Pod kopułą znajduje się stary sarkofag wraz ze zniszczonym reaktorem (źródło: materiał własny).

**Fig. 14.** „New Ark” Under the dome there is an old sarcophagus with a destroyed reactor (source: own material).

Pojazdy biorące udział w likwidacji postanowiono usuwać w dwóch, znajdujących się nieopodal siebie, miejscach, które były pod ścisłą ochroną. Nazwano je Burakówką oraz Rosochą. Pierwotnie po katastrofie w miejscach tych składowano kilkaset pojazdów, od cystern i wywrotek po czołgi, wozy strażackie czy śmigłowce. Wedle założenia, że nic, co miało styczność z materiałami promieniotwórczymi, nie może opuścić strefy, pojazdy porzucono bezpowrotnie na terenie strefy. W późniejszym czasie pojazdy zaczęły zniknąć za sprawą szabrownictwa będącego od początku utworzenia strefy wykluczenia największym problemem, z którym zmagają się służby. Wedle ustaleń na składowiskach obecnie znajduje się już tylko około 10 procent pierwotnej liczby pojazdów, które tam pozostawiono.



**Rys. 15.** Pojazdy mechaniczne na składowisku Rosocha (źródło: materiał własny).

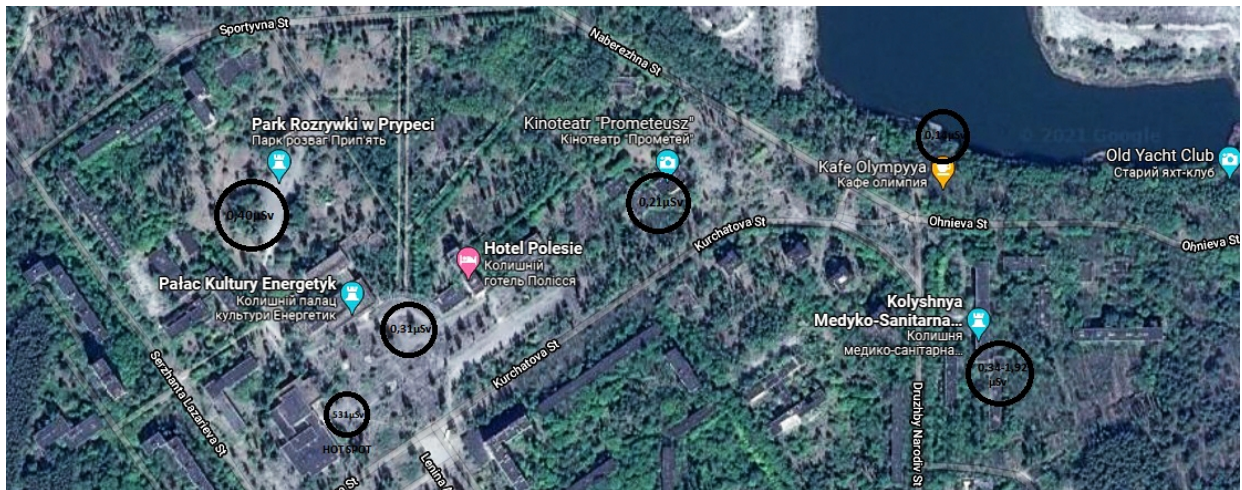
**Fig. 15.** Motor vehicles at the Rosocha landfill (source: own material).

Kiedy cała akcja likwidacyjna dobiegła końca oraz wykonano wszystkie czynności, jakie zaplanowano w związku z katastrofą, podjęto decyzję o ścisłym określeniu „strefy” i jej warunków przestrzennych. Zdecydowano o utworzeniu obszaru wykluczenia o średnicy 30 km z punktem „zero”, jakim jest elektrownia. Wewnątrz dużej strefy nazwanej buforową utworzono strefę ścisłej ochrony o średnicy 10 kilometrów, obejmującą między innymi miasto Prypeć, elektrownię, składowiska, pobliskie wioski i wszystkie przyległe elementy infrastruktury. Obie strefy, tj. buforowa i ścisła, objęte są punktami kontrolnymi. Podczas wjazdu do strefy 30-kilometrowej przechodzi się kontrolę obejmującą rozwinięte procedury bezpieczeństwa, takie jak np. kontrola dozymetryczna, pobranie indywidualnych dawkomierzy, wydanie przepustek, kontrola paszportowa. Wjazd do strefy 10-kilometrowej obejmuje te same procedury oraz dodatkowo kontrolę dozymetryczną pojazdów oraz indywidualną mającą na celu sprawdzenie poziomu przyjętej dawki promieniowania przez każdą z osób. Na terenie strefy wyznaczono również specjalne oddziały policji i wojska, które wykonują działania wyłącznie na terenie obszaru wykluczenia, a także decyzją administracji strefy uznano cały 30-kilometrowy obszar za rezerwat przyrody [22].

### 3. Poziomy promieniowania na terenie strefy czarnobylskiej

Poziomy promieniowania jonizującego na terenie strefy są w dużym stopniu zróżnicowane w zależności od otoczenia, podłoża czy też obecności resztek odpadów promieniotwórczych w danym miejscu, które miejscami wciąż występują. Aby określić poziom radioaktywności oraz ustalić, czy wartości wskazywane w danym miejscu są niebezpieczne, należy określić, jakie są normy naturalne, a następnie wskazać, czy wartości na terenie strefy czarno-





Rys. 16. Mapa przedstawiająca poziomy promieniowania (moce dawki) na terenie miasta Prypeć (źródło: Mapa – Google Maps/Pomiary promieniowania – materiał własny).

Fig. 16. Map showing radiation levels (dose rates) in the city of Pripet (source: Maps – Google Maps/Measurements of radiation – own material).

bylskiej znacząco odbiegają od dawki „bezpiecznej”. Za normę promieniowania jonizującego, którą przeciętny człowiek pochłania w ciągu roku, uznaje się 2,4 mSv, co w przeliczeniu na dawkę wyrażaną w pomiarach na terenie strefy wynosi 2400 Sv [23]. Dawką, po której mogą wystąpić u człowieka pierwsze objawy choroby popromiennej, jest 0,35 Sv, co w przeliczeniu wynosi 350 mSv. Ekspozycja na promieniowanie rzędu 2 Sv spowoduje ciężkie zmiany, wywołując przy tym zmiany skórne, podczas których skóra może „odpadać”, sprawiając ogromny ból. Dawka o wartości od 4 do 8 Sv może się okazać dawką śmiertelną w przypadku, kiedy nie zostaną podjęte odpowiednie kroki medyczne. Przekroczenie dawki 8 Sv wiąże się z nieodwracalnymi skutkami prowadzącymi do śmierci w agonii.

Przedstawione wartości promieniowania jonizującego i ich oddziaływanie na organizm ludzki należy porównać z wszystkimi przytoczonymi wartościami odnotowanymi na terenie strefy wykluczenia [24].

Mapa zamieszczona powyżej (rys. 16) przedstawia pierwszy z sektorów ścisłej strefy wykluczenia, tj. miasto Prypeć. Zaznaczone na mapie wartości skażenia promieniotwórczego zostały odnotowane na przełomie 14–19 listopada 2021 roku. Jak można zauważyć, wartości te w większości są bardzo bezpieczne, ponieważ w wielu przypadkach nie przekraczają wartości uznanej za normalną lub przekraczają ją nieznacznie. Należy jednak pamiętać, iż wartości skażenia w strefie są aspektem bardzo indywidualnym i zróżnicowanym w zależności od miejsca pomiaru, od tego, czy pomiar został wykonany przy ziemi, czy też w powietrzu, czy znajdujemy się blisko miejsca, gdzie prawdopodobnie rozrzucone były odłamki promieniotwórcze, czy chociażby pomiar wykonywany jest w zbliżeniu do ubrań, bądź pojazdów mechanicznych. Przykładem zjawiska zmienności poziomu radiacji może być jej poziom przy obiekcie handlowym w Prypeci, gdzie poziom radiacji (moc dawki) wahał się od 0,10 Sv/h do 0,41 Sv/h,

jednak kiedy dozymetr został zbliżony do pokrywy studzienki kanalizacyjnej (rys. 17), wskazał znacznie większą wartość, tj. 123,00 Sv/h, przy czym należy pamiętać, iż wskazana wartość występuje jedynie w bezpośrednim zbliżeniu do owego obiektu, dwa metry od niego wskazania ponownie znajdowały się w granicach 0,10–0,41 Sv/h.

Miejsca, przedmioty czy inne elementy, które wykazują silnie podwyższony poziom radiacji, nazywa się „hot-spot'em”. Podwyższone wartości mogą być spowodowane wieloma czynnikami, których nie da się konkretnie



Rys. 17. Pomiar mocy dawki promieniowania wykonany przy pokrywie studni kanalizacyjnej (źródło: materiał własny).

Fig. 17. Radiation dose rate measurement made at the cover of the sewage chamber (source: own material).



ustalić, jednak często są to szczątki elementów paliwowych, konstrukcyjnych reaktora lub elementy, które dawniej miały bezpośrednią styczność z obiektem bardzo silnie skażonym (rys. 18), w większości jednak pomiary wykazują wartości znikome i całkowicie bezpieczne dla człowieka, co neguje doniesienia o szkodliwych poziomach promieniowania, które są wszechobecne na terenie całej strefy. Jedyne obecnie miejsce, które może wywołać objawy choroby popromiennej, jest komora pod zniszczonym reaktorem, do której dostała się radioaktywna lawa powstała na skutek stopienia rdzenia reaktora.

Kolejna mapa (rys. 19) przedstawia drugi z trzech sektorów, w których zostały przeprowadzone pomiary dozymetryczne. Na podstawie danych uzyskanych w wyniku pomiarów dozymetrycznych w sześciu miejscach określono



Rys. 18. Pomiar mocy dawki promieniowania przy chwytaku, który przeniósł radioaktywne odłamki reaktora (źródło: materiał własny).

Fig. 18. Measurement of radiation dose rate at the gripper that transported radioactive reactor debris (source: own material).

zakres wartości mocy dawek promieniowania jonizującego od najmniejszej, która wynosiła 0,14 Sv/h, do największej, która wynosiła 0,68 Sv/h. Aby pomiary można było odnieść do jak największego obszaru, zostały one przeprowadzone w oddalonych od siebie miejscach, co pozwoliło na zweryfikowanie poziomów dozymetrycznych w zróżnicowanych lokalizacjach. Należy jednak zwrócić uwagę, iż poziom promieniowania w mieście Czarnobyl jest na tyle niski, że można mówić o praktycznie pełnym bezpieczeństwie radiologicznym w tym miejscu z wyjątkiem oczywiście miejsc wyszczególnionych, w których poziom ten może znacząco przekraczać normę. Należy również zaznaczyć, iż miasto Czarnobyl uznane jest za na tyle bezpieczne, że mogą je zamieszkiwać pracownicy elektrowni, pracownicy i inżynierowie „nowej arki”, dozymetryści, fizycy jądrowi oraz pozostały personel, który przez lata pozostanie na miejscu, ze względu na zaplanowane działania dotyczące rozbiórki starego sarkofagu zniszczonego reaktora czwartego bloku.

Ostatni z sektorów strefy (rys. 20) odnosi się *stricte* do terenu elektrowni oraz obiektów bezpośrednio do niej przyległych, przynależących jednocześnie do kompleksu budynków Czarnobylskiej EJ. Pomiary zostały przeprowadzone chociażby w sterowni reaktora numer 3 oraz numer 4. Został wykonany również pomiar przy betonowej ścianie dzielącej przejście do reaktora numer 3 z ruinami siłowni numer 4. Pozostałe pomiary kontrolne zostały wykonane przy nowej konstrukcji chroniącej zniszczony blok czwarty, przy budynku niedokończonego reaktora numer 5 oraz wewnątrz chłodni kominowych i pobliskiej farmie. Wartości mocy dawki promieniowania jonizującego oscylowały w granicach od 0,24 Sv/h do 4,03 Sv/h. Wartości te ze względu na miejsce ich odnotowania są bardzo małe, dzięki czemu elektrownia funkcjonuje nadal



Rys. 19. Mapa średnich wartości dozymetrycznych (mocy dawki) dla miasta Czarnobyl (źródło: Google Maps, opis własny).

Fig. 19. Map of mean dosimetric values (dose rates) for the city of Chernobyl (source: Google Maps, own description).



Rys. 20. Mapa średnich wartości dozymetrycznych dla obszaru elektrowni oraz terenów przyległych (źródło: Google Maps, opis własny).

Fig. 20. Map of average dosimetric values for the power plant area and adjacent areas (source: Google Maps, own description).

jako stacja rozdzielcza energii elektrycznej, nie produkując jednocześnie owej energii.

## Podsumowanie

Już samo zastosowanie w energetyce zawodowej byłego ZSRR, reaktorów kanałowych dużej mocy z moderatorem grafitowym chłodzonych wodą (typu RBMK), było istotną okolicznością sprzyjającą wystąpieniu awarii do jakiej doszło w Czarnobylu. Reaktory te charakteryzują się bowiem dodatnimi współczynnikami reaktywności. Dużo mniejsze reaktory kanałowe tego typu były wprawdzie z powodzeniem stosowane nie tylko w byłym ZSRR, ale także i w innych państwach, dysponujących bronią jądrową do produkcji plutonu-239 dla celów militarnych<sup>3</sup>. Jednak znaczne powiększenie rozmiarów rdzenia i mocy reaktora podyktowane względami efektywnego zastosowania go w energetyce, stworzyło nieporównanie większe wyzwania w zakresie bezpiecznego sterowania tak dużym reaktorem. Brak świadomości tych wyzwań doprowadził do zaprojektowania prętów regulacyjnych i systemu ich zrzutu do rdzenia w sposób uniemożliwiający, w pewnych sytuacjach, skuteczne wyłączenie reaktora. Do takiej sytuacji doszło w dniu poprzedzającym awarię (długotrwała praca z małą mocą, zatrucie ksenonem i jego kompensacja wysunięciem prętów z rdzenia, których jednoczesne i zbyt wolne wprowadzenie do rdzenia w celu wyłączenia reaktora spowodowało w początkowej fazie ich opuszczania gwałtowny i katastrofalny w skutkach wzrost mocy, stopień rdzenia i zniszczenie budynku reaktora).

Istotnym czynnikiem powodującym rozległe skażenia środowiska, poza zniszczeniem barier przeciwdziałających wydostaniu się produktów rozszczepienia z rdzenia do

otoczenia, był pożar ogromnych ilości grafitu, z których zbudowany jest rdzeń tego typu reaktorów.

Porównując podejście do zagadnień bezpieczeństwa współczesnych reaktorów w Europie i na świecie, z opisanymi w artykule sytuacjami w trakcie budowy i podczas eksploatacji elektrowni jądrowej w Czarnobylu, uderzający jest brak nadania priorytetu bezpieczeństwu i zapewnieniu jakości we wszelkich podejmowanych decyzjach i działaniach. Opisane sytuacje świadczą, iż priorytetem w eksploatacji były tam cele produkcyjne (wytwarzanie energii elektrycznej, czy być może plutonu) lub polityczno-propagandowe (np. sukces zaplanowanego eksperymentu w wyznaczonym terminie). We współczesnej europejskiej i światowej energetyce jądrowej, istotne funkcje nadzorczo kontrolne w zakresie bezpieczeństwa pełnią organy państwowego dozoru jądrowego. Kontrole te prowadzone są w sposób jawny i transparentny dla społeczeństwa. W przypadku Czarnobyla państwowa, zewnętrzna kontrola należała do policji politycznej, dla której bezpieczeństwo jądrowe najprawdopodobniej nie stanowiło priorytetu. Mimo, iż dość sprawnie wykrywała ona i odnotowywała różne uchybienia i nieprawidłowości, nie inicjowała działań naprawczych istotnych z punktu widzenia zapewnienia jakości i bezpieczeństwa jądrowego. Przykładem priorytetu celów propagandowych nad bezpieczeństwem ludności, była próba zatajenia początkowo faktu wystąpienia awarii. Później podjęto i skutecznie przeprowadzono ewakuację kilkudziesięciu tysięcy ludzi, oraz utworzono wokół elektrowni chronioną przed dostępem ludzi istniejącą do dziś strefę wykluczenia. Kwestie prób penetracji tej strefy przez osoby nieuprawnione, mimo istniejących zabezpieczeń i działań służb ochrony mogłyby być przedmiotem odrębnej publikacji. Fakt, że do nich dochodzi

<sup>3</sup> Reaktory z moderatorem grafitowym charakteryzują się dobrą wydajnością produkcji plutonu-239, a konstrukcja kanałowa umożliwia wyładunek pojedynczych kaset paliwowych w dowolnym czasie, bez wyłączania reaktora.



coraz częściej, wiąże się z naturalnym spadkiem poziomu promieniowania na terenie strefy na przestrzenie 36 lat jakie upłynęły od awarii.

Poziomy radiacji na terenie strefy wykluczenia są zjawiskiem bardzo zmiennym i indywidualnym dla każdego z miejsc w obszarze 30-kilometrowej strefy. Szeroki wachlarz czynników oraz sposobów i metod pomiaru odgrywa znaczącą rolę w ostatecznej wartości, jaką wskażą instrumenty pomiarowe. Do takich czynników należy bezpośredni pomiar przy glebie, pomiar w pobliżu obiektów lub przedmiotów, które mogły mieć dawniej bezpośredni kontakt z elementami reaktora, rodzaj i czułość instrumentów pomiarowych oraz oczywiście odległość od punktu awarii. Wartości mocy dawki odnotowane na terenie Prypeci, miasta Czarnobyl oraz elektrowni wskazują jednak, iż teren uznany za skażony na wieki jest bezpieczny, a natura dokonuje reintrodukcji w tymże miejscu. Należy zatem zauważyć, iż skrupulatna demonizacja owego miejsca, jakim jest Czarnobyl i obiekty mu przyległe, jest całkowicie bezzasadna i bezpodstawa, jednak występuje w dalszym ciągu ze względu na stereotypowe

myślenie o katastrofie z 1986 roku oraz przede wszystkim braku elementarnej wiedzy na temat promieniowania jonizującego.

### Podziękowania

Za inspirację, wyrozumiałość oraz pomoc merytoryczną przy pisaniu pracy magisterskiej, której fragmenty zostały zamieszczone w niniejszym artykule, pragnę złożyć serdeczne podziękowania mojemu promotorowi profesorowi Markowi Stefańskiemu oraz profesorowi Andrzejowi Strupczewskiemu.

Za udostępnienie i zgodę na wykorzystanie materiałów badawczych oraz fotograficznych pragnę złożyć serdeczne podziękowania doktorowi Krzysztofowi Fornalskiemu oraz Aleksandrowi Kupny'emu.

### Notka o autorze

Mgr Marek Niemczyk jest absolwentem wydziału prawa i administracji Wyższej Szkoły Bankowej w Gdańsku ze specjalnością bezpieczeństwo wewnętrzne.

### Literatura

1. Niemczyk M., *Elektrownia jądrowa w Czarnobylu jako cel ataków terrorystycznych*, praca magisterska na kierunku bezpieczeństwo wewnętrzne, Wydział Prawa i Administracji Wyższej Szkoły Bankowej w Gdańsku, Gdańsk, 2022.
2. Український інститут національної пам'яті, ЧОРНОБИЛЬСЬКЕ ДОСЬЄ КГБ. ВІД БУДІВНИЦТВА ДО АВАРІЇ. Збірник документів про катастрофу на ЧАЕС, Кijów 2020, ISBN 978-617-684-255-2.
3. <http://ncbj.edu.pl/rbmk-reaktor-z-czarnobyla/budowa-reaktora-rbmk>,
4. <http://atom.edu.pl/index.php/bezpieczenstwo/prawda-o-czarnobylu/140.html?task=view>,
5. [https://chernobyladventure.com/pl/chernobyl\\_zone.html](https://chernobyladventure.com/pl/chernobyl_zone.html), [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/32/020/32020405.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/020/32020405.pdf?r=1),
6. Когут О., Мака А., Детальніше про особливості літерних справ див.: Бірчак В., Довженко ров Ю., Попович О., Ясиневич Я. Архіви КГБ для медіа: посібник / ред.-упоряд. А. Олійник: Центр досліджень визвольного руху. К: К.Л.С., 2018.
7. Чорнобильська трагедія. Документи і матеріали / упоряд. Н.П. Барановська та ін. К.: Наукова думка, 1996.
8. [http://ncbj.edu.pl/zasoby/awarie/20\\_rocznica\\_czarnobyla.pdf](http://ncbj.edu.pl/zasoby/awarie/20_rocznica_czarnobyla.pdf)
9. Петров Ю. За паролем «Блискавка» // З архівів ВУЧК-ГПУ-НКВД-КГБ, 2001. №1.
10. Козлова Е. Они сражались с атомной стихией. М. Издательство ЗАО, Паруса, 2016.
11. Сидоренко А., Выпуск В., Так у тексті. Йдеться про Міністерство середнього машинобудування СРСР. Заводами-ви робниками основного обладнання реактора РБМК були Горьковський машинобудівний за вод та Ленінградський завод «Більшовик». Див. докладніше: История атомной энергетики Советского Союза и России / под редакцией З. История РБМК. М.: ИЗДАТ, 2003.
12. <http://ncbj.edu.pl/node/96>
13. <https://www.cire.pl/pliki/2/20latpoczer.pdf>
14. <http://atom.edu.pl/index.php/bezpieczenstwo/prawda-o-czarnobylu/140.html?task=view>
15. [http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal99/potrzebowski/Czarnobyl/SKUTKI/skutki\\_awarii.htm](http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal99/potrzebowski/Czarnobyl/SKUTKI/skutki_awarii.htm)
16. <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20140514STO47018/forsmark-czyli-jak-szwecja-ostrzegla-europe-o-wybuchu-w-czarnobylu>
17. <http://www.strefaczarnobyl.pl/akcja-ratownicza.html>
18. <https://www.kwantowo.pl/2016/04/24/czarnobyl-30-fotociekawostek-na-30-rocznice-katastrofy/>
19. Витяг з документа опубл.: З архівів вучк-гпу-нквд-кгб. – 2001. – № 1.
20. <https://nucleartoday.wordpress.com/2018/04/28/w-glebi-sarkofagu-stopa-slonia/>
21. Опубл.: З архівів вучк-гпу-нквд-кгб. – 2001.-№ 1.
22. [https://chernobyladventure.com/pl/chernobyl\\_zone.html](https://chernobyladventure.com/pl/chernobyl_zone.html)
23. <https://www.polityka.pl/tygodnikpolityka/nauka/1514050,1,promieniowanie---bezpieczne-i-nie.read>
24. <https://whatnext.pl/spawdz-jaka-dawka-promieniowania-jest-zabojcza-dla-czlowieka/>



## Nowe kierunki rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce

Wojciech Głuszewski, Maria Kubicka

To tytuł kolejnej konferencji Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej (SIOR), która odbyła się w dniach 9–10 maja tym razem w wersji hybrydowej w poznańskim hotelu Mercure. Wydarzenie zostało objęte patronatem Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Celem corocznych spotkań jest omówienie aktualnych kwestii prawnych związanych z przepisami w zakresie ochrony radiologicznej. Do udziału w spotkaniach zapraszane są poza inspektorami ochrony radiologicznej (IOR) również inne osoby związane z wykorzystaniem promieniowania jonizującego w przemyśle, ochronie zdrowia, rolnictwie, ochronie środowiska, nauce i kosmonautyce. W tym roku patronaty medialne nad konferencją objęły periodyki: *Inżynier i Fizyk Medyczny* oraz *Postępy Techniki Jądrowej (PTJ)*. Uczestnicy otrzymali również najnowszy numer biuletynu *Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna PAA*. Wymieniając zasadnicze kwestie omawiane na konferencji, odsyłamy czytelników do obszernych materiałów pokonferencyjnych, opublikowanych na stronie SIOR. Konferencję otworzył wykład dr. Łukasza Młynarkiewicza, Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, który omówił wyzwania, jakie stoją przed PAA w kontekście Programu Polskiej Energetyki Jądrowej. Prezes PAA będzie realizował swoje funkcje naczelnego organu dozoru jądrowego w Polsce na wszystkich etapach cyklu życiowego obiektów jądrowych, począwszy od etapu oceny środowiskowej i lokalizacji, przez projektowanie, budowę, rozruch, eksploatację, aż do ich likwidacji. W kolejnych wystąpieniach przedstawiciele dozoru jądrowego mgr Iwona Matujewicz i mgr Agnieszka Jaworska-Sobczak z Departamentu Ochrony Radiologicznej PAA omówiły najnowsze zmiany w prawie atomowym. Były również do dyspozycji uczestników konferencji w kwestiach ewentualnych pytań. Następnie mgr Krzysztof Madaj, dyrektor Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP) w Otwocu, krótko przedstawił historię postępowania z odpadami promieniotwórczymi w Polsce. Przypomniał, że w ostatnim

czasie ZUOP obchodził dwa ważne jubileusze. W 2021 roku upłynęło 60 lat od rozpoczęcia eksploatacji jedynego w Polsce Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Różanie, a 1 stycznia 2022 roku minęło 20 lat od wydzielenia Zakładu Doświadczalnego Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZDUOP) z Instytutu Energii Atomowej (IEA) i przekształcenia go w przedsiębiorstwo państwowej użyteczności publicznej ZUOP. Zwrócił również uwagę na edukacyjną działalność pracowników składowiska. Dr Sylwester Sommer z Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej (ICHTJ) w Warszawie wrócił do tematu niskich dawek promieniowania stosowanych do leczenia powikłań oddechowych przy infekcji



SARS-CoV-2. Na początku roku 2020 zaproponowano terapię polegającą na napromienianiu płuc niskimi dawkami promieniowania (LDR), rzędu 500 mSv. LDR od lat 20. XX wieku używane były, z dobrym skutkiem, w leczeniu zapalenia płuc. Znanie są również właściwości immunomodulujące LDR. Te dwie cechy LDR oraz grupa ludzi, którzy opowiadają się za dobroczynnym działaniem promieniowania jonizującego, zaowocowały około 10 próbami klinicznymi i ponad 60 publikacjami, w większości teoretycznymi, na temat możliwości leczenia SARS-CoV-2 za pomocą LDR. Dr inż. Wojciech Głuszewski z IChTJ przybliżył kwestie badań na radiolizę polimerów stosowanych w ochronie przed radonem. Przedstawił sposoby porównania odporności radiacyjnej dostępne w handlu folii, membran i lepek polecanych jako bariery wilgotnościowe i antyradonowe. Przypomniał również historię zaprzyjaźnionego z SIOR kwartalnika PTJ w związku z 10-leciem jego działalności w ramach IChTJ. W następnej prezentacji mgr Michał Zuba z PAA odniósł się do kwestii obowiązku opracowania przez kierowników jednostek organizacyjnych, wykonujących działalność związaną z narażeniem systemu zarządzania sytuacjami zdarzeń radiacyjnych, opisującego całość rozwiązań jednostki organizacyjnej w zakresie przygotowania i reagowania na zdarzenia radiacyjne. Ustalono, że prelegent na wszystkie szczegółowe kwestie, których, jak się okazało, było bardzo dużo, odpowie w formie korespondencji elektronicznej. Monitoring radiologiczny środowiska w Polsce z użyciem pasywnych detektorów termoluminescencyjnych (TLD) to temat wykładu prof. Macieja Budzanowskiego z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN. Detektory MCP-N zostały wykorzystane w akredytowanym laboratorium LADIS IFJ PAN do dozymetrii środowiskowej. Obecnie wykonywanych jest średnio 18 tys. pomiarów rocznie w ponad 5000 punktów w Polsce. O aspektach ochrony radiologicznej w programie budowy polskiej elektrowni jądrowej mówił dr Krzysztof Fornalski ze spółki Polskie Elektrownie Jądrowe i Narodowe Centrum Badań Jądrowych. W konkluzji podkreślił, że wszystkie przeprowadzone analizy pokazały jednoznacz-

nie, iż z punktu widzenia ochrony radiologicznej pierwsza polska elektrownia jądrowa nie będzie stanowić zagrożenia dla okolicznych mieszkańców. Dr Andrzej Mikulski reprezentujący Polskie Towarzystwo Nukleoniczne przedstawił scenariusze wprowadzania energetyki jądrowej w Polsce. W szczególności odniósł się do planów budowy małych reaktorów jądrowych. O problemach z radonem na terenach górniczych opowiedziała prof. Małgorzata Wysocka z Głównego Instytutu Górniczego. Jednym z głównych czynników wpływających na migrację radonu jest dezintegracja górotworu, powodowana eksploatacją węgla kamiennego, a w przeszłości rud metali. Szacuje się, że w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w około 2% mieszkań, stężenie radonu może przekraczać poziom 300 Bq/m<sup>3</sup>. Obecnie część kopalń węgla kamiennego jest zamknięta, lub przygotowana do procesu likwidacji. W związku z tym postawiono pytanie: czy procesy zamykania kopalni zwiększają migrację radonu? Jak długi jest okres występowania zmian stężeń radonu w budynkach po zaprzestaniu działalności górniczej? Chcąc uzyskać wiedzę i odpowiedzieć na postawione pytania, porównano aktualne wyniki stężeń radonu w pomieszczeniach z wynikami archiwalnymi z lat 90. ubiegłego wieku. Stwierdzono, że w niektórych obszarach, zwłaszcza w piwnicach budynków, stężenie radonu znacznie wzrosło w porównaniu z danymi sprzed ponad 30 lat. Dr hab. Jerzy Olszewski z Instytutu Medycyny Pracy im. prof. dr J. Nofera w Łodzi udowodnił w wykładzie, że zgodnie z aktualnymi przepisami prawnymi radon przestaje być ciekawostką, a staje się problemem szczególnie dla pracodawców. Rozpatrując natomiast średnie arytmetyczne pomiarów dla poszczególnych podziemnych tras turystycznych, zwrócił uwagę, że tylko w jednej z nich wartości były poniżej progu czułości, natomiast w 67 procentach przekroczyły 300 Bq/m<sup>3</sup>. Jak wynika z przedstawionych wyników, w świetle zapisów zawartych w Prawie atomowym, radon występujący w podziemnych trasach turystycznych stanowi problem zarówno techniczny, jak i zdrowotny. Konferencję zakończył wykład dr. Krzysztofa Kozaka z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN „Promieniotwórczość gamma indukowana w placówkach medycznych na przykładzie cyklotronu Proteus C-235 w Centrum Cyklotronowym Bronowice (CCB) IFJ PAN – aspekty fizyczne i dozymetryczne”. Przedstawione zostały wyniki jednych z pierwszych, kompleksowych pomiarów promieniotwórczości gamma, indukowanej w hali cyklotronu, na stanowisku terapii oka, na stanowiskach gantry i w materiałach konstrukcyjnych budynku, w trakcie rutynowej pracy ośrodka CCB IFJ PAN w Krakowie.

Konferencja była jak zwykle bardzo dobrze zorganizowana. Uczestnicy, a w szczególności inspektorzy IOR, mieli możliwość po wielu miesiącach obostrzeń związanych z Covid-19 spotkać się na żywo z przedstawicielami PAA. Można przypuszczać, że również w kularowych rozmowach i dyskusjach wyjaśniono wiele praktycznych kwestii związanych z codzienną działalnością IOR.



Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” wydawany jest od 1989 r. Do 2013 r. był drukowany i kolportowany (ostatnio w nakładzie 700 egzemplarzy) wśród osób i instytucji zainteresowanych zagadnieniami dozoru nad bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną. Od 2014 r. biuletyn wydawany jest w nowej, elektronicznej formie. Każdy numer biuletynu zamieszczany jest na stronie internetowej.

**Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:**

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

## INFORMACJA DLA AUTORÓW

Wydawca przyjmuje artykuły naukowe, których tematyka jest związana z zapewnieniem i kontrolą bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, w tym również związane z zabezpieczeniem i ochroną fizyczną materiałów jądrowych i obiektów jądrowych, technologiami jądrowymi i technikami radiacyjnymi, fizyką i chemią oraz inżynierią jądrową, naukami prawnymi, geologią i geofizyką czy bezpieczeństwem narodowym.

Każdy artykuł zamieszczony w biuletynie jest recenzowany przez dwóch recenzentów.

## ZASADY OGÓLNE

Tekst artykułu powinien prezentować aktualny stan wiedzy na poruszany temat oraz najnowsze dane. Artykuł powinien być podzielony na mniejsze logiczne fragmenty redakcyjne, opatrzone śródtytułami. Artykuł nie może być wcześniej publikowany ani zgłoszony do publikacji w innym czasopiśmie. Wydawca zastrzega sobie prawo nieprzyjęcia artykułu do publikacji, dokonywania skrótów, wprowadzania poprawek stylistycznych i redakcyjnych oraz zmian w tytule artykułu. Autorzy są zobowiązani do współpracy z Wydawcą w całym procesie przygotowywania artykułu do publikacji, w tym do terminowej korekty autorskiej.

## ZGŁOSZENIE DZIEŁA

Egzemplarze artykułu wraz z pełnym zestawem ilustracji mogą być przesyłane na adres:

**Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”**

**Państwowa Agencja Atomistyki**

**ul. Bonifraterska 17,**

**00-203 Warszawa, Polska**

E-mail: [biuletyn@paa.gov.pl](mailto:biuletyn@paa.gov.pl)

Zachęcamy do przesyłania artykułów drogą elektroniczną na wyżej wskazany adres e-mail. Szczegółowe informacje można uzyskać na stronie internetowej:

<https://www.gov.pl/web/paa/biuletyn-bezpieczenstwo-jadrowe-i-ochrona-radiologiczna>





Państwowa Agencja Atomistyki  
ul. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa  
[www.gov.pl/web/paa](http://www.gov.pl/web/paa)