

e-ISSN 2353-9062
ISSN 0867-4752

1(131) 2024

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

35 - LECIE BIULETYNU



PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

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. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa

Redakcja: **Elżbieta ZALEWSKA**
Jarosław CHILMON
ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa
TEL. 22 628 94 39
FAX 22 621 37 86
E-MAIL biuletyn@paa.gov.pl
www. 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. JANIAK** – członek Rady
prof. dr hab. n. med. **Eugeniusz DZIUK** – członek Rady
prof. dr hab. n. med. **Leszek KRÓLICKI** – 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: Print Profit Sp. z o.o., Koźmin 27, 59-900 Zgorzelec

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

BIULETYN INFORMACYJNY PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI

Nr 1 (131) 2024

Warszawa

Spis treści

Maciej Jurkowski

Biuletyn *Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna* – jego geneza, program i twórcy. 6

Antoni Badora

Nakreślenie i ocena najważniejszych zmian w polskiej procedurze lokalizacyjnej elektrowni jądrowej. 9

Sylwester Sommer, Katarzyna Sikorska

Częstość aberracji u zdrowych dawców – wartość istotna dla monitoringu populacji w trakcie rozwoju energetyki jądrowej 17

Wojciech Głuszewski

Wykorzystanie w technice radiacyjnej rozproszonego promieniowania wokół skanera przemysłowego akceleratora elektronów 25

Jacek Kaczmarczyk, Aneta Łukaszek-Chmielewska, Sławomir Jednoróg

Fuzja jądrowa we Wszechświecie. 30

Alicja Jakubowska, Kamila Kempny, Zuzanna Pawłowska

Wzorcowanie przyrządów dozymetrycznych: praktyczny przewodnik dla użytkowników 42

Szanowni Państwo

W bieżącym roku mija 35 lat od ukazania się pierwszego numeru naszego Biuletynu „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna” wydawanego, jak to określono w zamieszczonym w nim słowie wstępnym, przez „Państwowy Dozór Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej”, ustanowiony ustawą Prawo atomowe z dnia 10 kwietnia 1986 roku, którego szczegółowe zadania i tryb wykonywania doprecyzowało rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 stycznia 1988 roku. Pomysłodawcą i inicjatorem wydawania kwartalnika był organizator i pierwszy Główny Inspektor Dozoru Jądrowego (GIDJ) w Polsce – doc. mgr inż. Wacław Dąbek, który określił cele i zakres tematyczny wydawnictwa, a następnie (w latach 1989–1993) sprawował nad nim nadzór merytoryczny w roli przewodniczącego rady programowej. Podobny nadzór nad publikacjami w Biuletynie sprawowali kolejni główni inspektorzy – Witold Łada w latach 1994–2008 oraz Maciej Jurkowski (2008–2014), ten ostatni także później, jako były GIDJ, aż do chwili obecnej. Niżej, po słowie wstępnym zamieściliśmy szerszą informację o okolicznościach powstania pierwszego numeru naszego Biuletynu, jego autorach oraz założeniach programowych i planowanej wówczas tematyce.

W bieżącym numerze pierwszy i drugi z opublikowanych artykułów nawiązują do tematyki **realizacji Programu polskiej energetyki jądrowej (PPEJ)**. Zdominowała ona poprzedni numer Biuletynu, w którym wskazano między innymi nie tylko sekwencję podjętych ważnych decyzji (**zasadniczej, środowiskowej i lokalizacyjnej**) oraz zawarcie **kontraktu na opracowanie projektu** z konsorcjum Westinghouse-Betchel, oznaczających **rozpoczęcie realizacji projektu** elektrowni jądrowej z reaktorami AP1000 w **lokalizacji** Lubiатовo-Kopalino w gminie Choczewo w północnej Polsce, ale także podjęcie w listopadzie ubiegłego roku **decyzji zasadniczej** dotyczącej koreańskich bloków jądrowych APR1400, uznającej ich budowę w **lokalizacji** Pątnów-Adamów za zgodną z interesem społecznym.

Efektywne ustalenie obu lokalizacji umożliwiła znowelizowana procedura lokalizacyjna opisana w pierwszym artykule. **Antoni Badora** opisał w nim rozwiązania wprowadzone nowelizacją ustaw związanych z realizacją inwestycji z zakresu energetyki jądrowej, które znacząco wpłynęły na skrócenie czasu potrzebnego do finalizacji procedury lokalizacyjnej. Autor wykazał, iż ułatwione zostało sporządzanie badań lokalizacyjnych i środowiskowych, a także zapewniono spójność przepisów, dzięki której opinie Prezesa PAA mogą służyć za skuteczny instrument prelicencjonowania. Dzięki zmianie kolejności uzyskiwania decyzji zasadniczej zmniejszeniu uległo także ryzyko niepowodzenia planowanych inwestycji.

W drugim artykule **Sylwester Sommer i Katarzyna Sikorska** podjęli temat zasadności rozwijania metod cytogenetycznych, takich jak systematyczny monitoring częstości aberracji chromosomowych u zdrowych dawców zamieszkujących w sąsiedztwie lokalizacji przyszłych elektrowni jądrowych, a także na terenach o podwyższonym stężeniu radonu. Monitoring taki, prowadzony w dłuższym okresie, pozwoli zaobserwować niewielkie zmiany częstości aberracji u dawców, w tym także m.in. przyszłych pracowników elektrowni, co umożliwi realną ocenę skali genotoksycznego oddziaływania takich obiektów czy też podwyższonego tła radonowego w porównaniu z dawcami z obszarów, gdzie takie podwyższenie nie występuje.

Trzy pozostałe artykuły poświęcone są różnym aspektom występowania, detekcji i możliwości wykorzystania promieniowania jonizującego, a także przemianom i reakcjom jądrowym (które są źródłem takiego promieniowania) w skrajnej perspektywie retrospektywnej, sięgającej początków Wszechświata.

Wojciech Głuszewski zwrócił w swoim artykule uwagę na **możliwości wykorzystania** promieniowania elektronowego oraz promieniowania hamowania, rozpraszane poza szerokość transportera akceleratora przemysłowego służącego do sterylizacji wyrobów medycznych. Oba rodzaje wychodzące poza transporter promieniowania można wykorzystać do obróbki radiacyjnej materiałów bardzo dużymi dawkami (rzędu mega i giga Gy). Autor opisał **metody dozymetryczne** stosowane do określenia tych dawek w konkretnych przypadkach napromieniowań, właściwości i działanie folii z polichlorku winylu jako dozymetru oraz dozymetrii z wykorzystaniem sygnału elektronowego rezonansu paramagnetycznego (EPR) napromieniowanej alaniny. Opisał także **eksperyment obróbki radiacyjnej w warunkach rzeczywistych** omówionym wyżej promieniowaniem kawałków bursztynu z zastosowaniem z sukcesem do celów dozymetrycznych folii z polichlorku winylu i dozymetrii EPR/alaninowej.

W kolejnym artykule **Jacek Kaczmarczyk, Aneta Łukaszek-Chmielewska i Sławomir Jednoróg** opisać w zwięzłej, przystępnej formie dynamiczną ekspansję (inflację) wszechświata od chwili „Wielkiego Wybuchu” z towarzyszącymi jej procesami **nukleosyntezy** – łączenia się protonów i neutronów w jądra lekkich pierwiastków, przyłączania się elektronów i **wytwarzania** swobodnie poruszających się **wiązek fotonów** – tzw. mikrofalowego promieniowania tła (CMB) wykrytego w 1964 roku. Badania nad nim w ciągu ostatniego półwiecza potwierdziły teorię kosmologii inflacyjnej i umożliwiły określenie parametrów kosmologicznych z niespotykaną jak dotychczas dokładnością. Artykuł ukazuje, jak wiedza z zakresu fizyki jądrowej pozwoliła



określić te parametry, w tym przemiany jądrowe prowadzące do powstawania poszczególnych pierwiastków i opisać procesy warunkujące ewolucję wszechświata.

Numer zamyka artykuł **Alicji Jakubowskiej, Kamili Kempny i Zuzanny Pawłowskiej** na temat wzorcowania przyrządów dozymetrycznych, stanowiący praktyczny przewodnik dla użytkowników. Omówiono w nim zarówno teoretyczne **podstawy dozymetrii** promieniowania jonizującego, jak i problematykę **wzorcowania przyrządów dozymetrycznych** wraz z aspektami prawnymi. Opisano w nim różne rodzaje promieniowania, wielkości fizyczne stosowane w dozymetrii, typy detektorów, podano, na czym polega wzorcowanie, co to są wzorce podstawowe, jednostki miary, wzorce wtórne oraz spójność pomiarowa. Omówiono także zagadnienia praktyczne, takie jak dobór parametrów wzorcowania, przygotowanie zlecenia wzorcowania w laboratorium posiadającym stosowne uprawnienia oraz jak właściwie korzystać z świadectwa wzorcowania.

Życzymy Państwu owocnej lektury,

Redaktor Naczelny
Maciej Jurkowski

Biuletyn *Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna* – jego geneza, program i twórcy

Jak już wspomniano w słowie wstępnym, pomysłodawcą i inicjatorem wydawania kwartalnika był organizator i pierwszy Główny Inspektor Dozoru Jądrowego (GIDJ) w Polsce – doc. mgr inż. Waclaw Dąbek, który określił cele i zakres tematyczny wydawnictwa. W przedmowie do pierwszego numeru wydanego w roku 1989 wskazał trzy główne bloki problemowe.

Pierwszy z nich to obowiązujące przepisy prawne (niżej przytoczyliśmy zamieszczony w pierwszym numerze wykaz przepisów Prawa atomowego, jakie obowiązywały już w roku 1989), określające wymagania w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej (bj i or) obiektów jądrowych, postępowania z odpadami promieniotwórczymi, działalności za źródłami promieniowania oraz dotyczące innych sytuacji związanych z narażeniem na promieniowanie jonizujące. Przewidywane publikacje to teksty tych przepisów, ich interpretacja, wprowadzane w nich zmiany oraz komentarze prawne.

Drugi blok tematyczny to artykuły poświęcone naukowym i technicznym problemom bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, związanym z prowadzonymi przez dozór jądrowy analizami dokumentacji bezpieczeństwa w procesie licencjonowania obiektów jądrowych. Przewidziano w nim również artykuły wyjaśniające przyczyny, przebieg i skutki poważniejszych zakłóceń w wykorzystaniu energii jądrowej, które zaszły u użytkowników na terenie kraju.

Trzeci blok miały stanowić przeglądy artykułów prasowych, krytycznych wobec nie tylko wykorzystania energii jądrowej, ale w ogóle zastosowań promieniowania jonizującego oraz fachowe wyjaśnienia najbardziej nurtujących społeczeństwo problemów bj i or. Przewidziano w nim także publikacje informujące o roli, zadaniach i sposobie działania organów dozoru jądrowego, sprawujących państwowy nadzór i kontrolę wszelkiej działalności mogącej powodować narażenie na promieniowanie jonizujące.

W przedmowie do pierwszego numeru Główny Inspektor podkreślił także, że dozór jądrowy, poczuwając się z racji upoważnień ustawowych do pełnienia roli „rzecznika obywatelskiego prawa do życia w warunkach wolnych od zagrożenia radiacyjnego”, przygotowuje rokrocznie

raporty dla Sejmu (i Rządu) o stanie bj i or w kraju, których istotne fragmenty także przewidziane są do publikacji na łamach Biuletynu.

Pierwszy numer Biuletynu otwierał **artykuł programowy** autorów Marka Bernatowicza, Waclawa Dąbka, Macieja Jurkowskiego, Ryszarda Siwickiego, Janusza Włodarskiego i Arkadiusza Zmysłowskiego „*Rola dozoru jądrowego i zakres jego działania*”.

Ponadto zamieszczono w nim artykuły: prawników Stanisława Kraszewskiego i Macieja Święckiego „*Wykorzystywanie energii atomowej jako przedmiot regulacji prawnej*”, Ewy Szkulteckiej „*Struktura, zadania i działalność Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej*”, Ryszarda Siwickiego „*Ośrodek Dyspozycyjny Służby Awaryjnej*”, Bożeny Gostkowskiej „*Szkolenie Inspektorów Ochrony Radiologicznej*”, Andrzeja Pietruszewskiego i Ryszarda Zarudzkiego „*Krajowy system zabezpieczeń i kontroli materiałów jądrowych*”, Dariusza Grabowskiego „*Kontrola skażeń promieniotwórczych w Polsce*” oraz Krystyny Winnickiej „*Analiza artykułów prasowych z 1988 r. na temat atomistyki i energetyki jądrowej*”.

Prezentując zespół, który ten pierwszy numer przygotował, przytaczamy niżej zamieszczone w nim notki o autorach, w istocie – **współtwórcach Biuletynu**. W większości były to osoby stanowiące trzon kadry kierowniczej organizowanego wówczas w CLOR zespołu dozoru jądrowego.

Marek Bernatowicz – dr inż., absolwent Wydziału Mechaniki, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, kierownik Zespołu Dozoru Jądrowego w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, st. inspektor dozoru jądrowego, specjalista bezpieczeństwa w energetyce jądrowej.

Waclaw Dąbek – doc. mgr inż., absolwent Wydziału Łączności Politechniki Warszawskiej, od 1968 roku zastępca dyrektora do spraw energetyki jądrowej w Instytucie Badań Jądrowych. W latach 1975–1980 pracuje w Wiedniu w Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej jako jeden z sekretarzy naukowych w programie Nuclear Safety Series. Od 1983 roku zastępca dyrektora Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej, po utworzeniu Państwowego Dozoru Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochro-

ny Radiologicznej zostaje powołany na stanowisko Głównego Inspektora Dozoru Jądrowego, specjalista inżynierii reaktorowej i bezpieczeństwa jądrowego.

Bożena Gostkowska – mgr, absolwentka Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Marii Skłodowskiej-Curie w Lublinie, kierownik Działu Szkolenia i Informacji w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, wykładowca w Podyplomowym Studium Metod Radiochemicznych i Radiometrycznych.

Dariusz Grabowski – mgr, absolwent Wydziału Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, kierownik Zakładu Ochrony przed Skażeniami w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Maciej Jurkowski – mgr inż., absolwent Wydziału Mechaniki, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, kierownik Pracowni Przeglądu i Oceny Dokumentacji Bezpieczeństwa w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, st. inspektor dozoru jądrowego, specjalista bezpieczeństwa w energetyce jądrowej.

Stanisław Kraszewski – dr nauk prawnych, pracownik naukowy w Zakładzie Prawa Administracyjnego Uniwersytetu im. Mikołaja Kopernika w Toruniu, członek zespołu do spraw przygotowania ustawy – Prawo atomowe i aktów wykonawczych.

Andrzej Pietruszewski – mgr inż., absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej, kierownik Pracowni Radiometrii w Zakładzie Dozymetrii Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej, inspektor dozoru jądrowego, kierownik Krajowego Systemu Zabezpieczenia Materiałów Jądrowych.

Ryszard Siwicki – mgr inż., absolwent Wydziału Łączności Politechniki Warszawskiej, kierownik Zakładu Kontroli w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, st. inspektor dozoru jądrowego, specjalista ochrony radiologicznej.

Ewa Szkultecka – mgr, absolwentka Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Warszawskiego oraz Podyplomowego Studium Zagadnień Legislacyjnych UW, st. specjalista w Zespole Dozoru Jądrowego w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Maciej Świącki – dr nauk prawnych, pracownik naukowy Uniwersytetu im. Mikołaja Kopernika w Toruniu (Zakład Prawa Administracyjnego), członek zespołu do spraw przygotowania ustawy – Prawo atomowe i aktów wykonawczych.

Krystyna Winnicka – mgr, absolwentka Wydziału Filologii Polskiej Uniwersytetu im. Mikołaja Kopernika w Toruniu, gł. specjalista w departamencie Szkolenia i Informacji Społecznej w Państwowej Agencji Atomistyki.

Janusz Włodarski – mgr inż., absolwent Wydziału Mechaniki, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, kierownik Pracowni Zapewnienia Jakości w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, st. inspektor

dozoru jądrowego, specjalista bezpieczeństwa w energetyce jądrowej.

Ryszard Zarudzki – mgr inż., absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej, inżynier w Pracowni Radiometrii w Zakładzie Dozymetrii Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej, inspektor dozoru jądrowego.

Arkadiusz Zmysłowski – mgr inż., absolwent Wydziału Mechaniki, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, dyrektor Głównego Inspektoratu Dozoru Jądrowego w Państwowej Agencji Atomistyki, specjalista bezpieczeństwa w energetyce jądrowej.

W nawiązaniu do informacji, że w zarysowanym w przedmowie do pierwszego numeru z 1989 roku zakresie tematyki kwartalnika jako **pierwszy blok problemowy** wskazano **obowiązujące przepisy prawne**, warto przypomnieć, iż już wtedy ich lista, zamieszczona w pierwszym numerze, poza Prawem atomowym – ustawą z dnia 10 kwietnia 1986 roku (Dz.U. nr 12 poz.70; zm.: Dz.U. z 1987 r. nr 33 poz. 180) obejmowała 14 następujących pozycji:

1) Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 stycznia 1988 roku w sprawie **organizacji, szczegółowych zadań i trybu wykonywania państwowego dozoru** bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej (Dz.U. nr 4, poz. 30),

2) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 28 lipca 1987 roku w sprawie **ewidencji i kontroli źródeł** promieniowania jonizującego (M.P. nr 27 poz. 214)¹,

3) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 28 lipca 1987 roku w sprawie **rodzajów stanowisk** mających istotne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej **oraz warunków i trybu nadawania uprawnień** koniecznych do ich zajmowania (M.P. nr 27 poz. 215),

4) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 20 października 1987 roku w sprawie **zasad ewidencji i kontroli materiałów jądrowych** (M.P. nr 33 poz. 285),

5) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 25 stycznia 1988 roku w sprawie wymagań, jakim powinien odpowiadać **sprzęt dozymetryczny** stosowany w ochronie radiologicznej, oraz wymagań dotyczących **ewidencjonowania wyników pomiarów dozymetrycznych** (M.P. nr 6 poz. 59),

6) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 25 lutego 1988 roku w sprawie warunków **przywozu z zagranicy, wywozu za granicę oraz przewozu przez terytorium** Polskiej Rzeczypospolitej Ludowej **materiałów jądrowych, źródeł promieniotwórczych i urządzeń zawierających takie źródła** (M.P. nr 9 poz. 82),

¹ W tamtym czasie Prezes Państwowej Agencji Atomistyki podlegał bezpośrednio Prezesowi Rady Ministrów, a jego zarządzenia podlegały opublikowaniu w Monitorze Polskim, podobnie jak zarządzenia ministrów.

7) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 31 marca 1988 roku w sprawie **dawk granicznych promieniowania jonizującego i wskaźników pochodnych określających zagrożenie** promieniowaniem jonizującym (M.P. nr 14 poz. 124),

8) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 1 czerwca 1988 roku w sprawie szczegółowych zasad tworzenia i zagospodarowania **strefy ochronnej wokół obiektu jądrowego** (M.P. nr 20 poz. 180),

9) Zarządzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z dnia 6 czerwca 1988 roku w sprawie zasad **ochrony fizycznej materiałów jądrowych** (M.P. nr 20 poz. 181),

10) Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 23 lutego 1987 roku w sprawie szczegółowego **zakresu działania Państwowej Agencji Atomistyki i Prezesa PAA** (Dz.U. nr 9 poz. 55),

11) Uchwała nr 20/87 Rady Ministrów z dnia 23 lutego 1987 roku w sprawie **statutu Państwowej Agencji Atomistyki** (nie publikowane),

12) Zarządzanie Ministra Finansów z dnia 26 sierpnia 1986 roku w sprawie określenia zakładu ubezpieczającego **odpowiedzialność cywilną osób eksploatujących obiekt jądrowy** (M.P. nr 28 poz. 201),

13) Zarządzanie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 18 listopada 1988 roku w sprawie **warunków, jakie powinny spełniać pracownie rentgenowskie** oraz zasad pracy związanej z posługiwaniem się aparatami rentgenowskimi (M.P. nr 32 poz. 295),

14) Zarządzanie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 16 lipca 1988 roku w sprawie **zakresu oraz zasad szkolenia osób odpowiedzialnych** za stan ochrony przed promieniowaniem jonizującym w **pracowniach rentgenowskich** (M.P. nr 25 poz. 223).

W stopce redakcyjnej pierwszego numeru wskazano jako wydawcę „Państwowy Dozór Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej” z siedzibą w Warszawie przy ul. Kruczej 36 (czyli siedzibę Prezesa PAA, określonego w ustawie jako **naczelny organ dozoru jądrowego**), natomiast jako adres redakcji wskazano ul. Konwaliową 7 (siedzibę CLOR). Redaktorem naczelnym był **Jerzy Zandberg**, a sekretarzem redakcji – **Ewa Szkultecka**.

Od tamtego czasu kwartalnik „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna” ukazuje się nieprzerwanie aż do chwili obecnej – do końca ub. roku opublikowano 130 numerów.

Nakreślenie i ocena najważniejszych zmian w polskiej procedurze lokalizacyjnej elektrowni jądrowej

Outlining and assessment of the main changes in the Polish nuclear power plant's localization procedure

Antoni Badora

Wydział Prawa i Administracji Uniwersytetu Warszawskiego

Streszczenie: Nowelizacja ustaw związanych z realizacją inwestycji z zakresu energetyki jądrowej znacząco wpłynęła na procedurę lokalizacyjną elektrowni jądrowej. Wprowadzone rozwiązania skracają czas potrzebny do finalizacji procedury, dzięki m.in. umożliwieniu jednoczesnego prowadzenia większej liczby postępowań oraz zmianie niektórych terminów i wymagań dotyczących części wniosków. Nowe regulacje ograniczają także niepewność inwestorów co do ryzyka niepowodzenia planowanych inwestycji, w dużej mierze wskutek zmiany w kolejności uzyskiwania decyzji zasadniczej. Ułatwione zostało sporządzanie badań lokalizacyjnych i środowiskowych, a także zapewniono spójność przepisów, dzięki której opinie Prezesa PAA mogą służyć za skuteczny instrument prelicencjonowania. Ogólna ocena wprowadzonych zmian jest pozytywna.

Słowa kluczowe: Prawo energii jądrowej, lokalizacja inwestycji, licencjonowanie, prelicencjonowanie.

Abstract: Revision of the legislation related to carrying out investments in the field of nuclear energy had considerable influence on the nuclear plant's localization procedure. The solutions implemented help in reducing the time needed for the procedure to finalize, mainly thanks to creating the possibility of simultaneous conduction of many legal proceedings and making changes to some of the deadlines and requirements for the necessary applications. New regulations also limit the investor's uncertainty in regards to the risk of the localization procedure's failure, in large part due to the change in order of obtaining the decision-in-principle. Creation of the localization and environmental impact assessment surveys was made easier, and the cohesion of different provisions was achieved, changing the opinions of the PAA's President into an effective prelicensing tool. The general assessment of the implemented changes is positive.

Keywords: Nuclear law, investment's localization, licensing, prelicensing.

Wprowadzenie

Dnia 13 kwietnia 2023 roku weszła w życie ustawa o zmianie ustawy o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (dalej nazywanej ustawą inwestycyjną) oraz niektórych innych ustaw [1, 2], wprowadzając do porządku prawnego efekty długiego procesu legislacyjnego. Nowelizacja ta jest kolejną poważną zmianą w polskim prawie energii jądrowej, którą tworzą przede wszystkim dwa akty prawne – wspomniana ustawa inwestycyjna oraz ustawa Prawo atomowe [3]. Do tej pory ewolucja tego obszaru prawa w XXI wieku doprowadziła do m.in. ukształtowania nowego sposobu licencjonowania obiektów energetyki jądrowej ze zmniejszoną liczbą wymaganych do uzyskania

decyzji, poszerzenia możliwości udziału społecznego w procesie inwestycyjnym i działalności tychże obiektów czy też zastąpienia Rady do spraw Atomistyki przez Radę ds. Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej [4]. Nowelizacja będąca tematem tego artykułu pojawia się w wyjątkowo obiecującym momencie dla przyszłości polskiej energetyki jądrowej, której dotychczasowa historia naznaczona jest brakiem efektu w postaci powstania elektrowni jądrowej na terenie Polski [5]. Obecnie zauważyć można znaczne zainteresowanie inwestycjami jądrowymi na terenie naszego kraju [6], połączone z rekordowym poziomem społecznej akceptacji dla energii jądrowej [7]. Obserwacje te powinny być powodem do zadowolenia, przynoszą bowiem nadzieję na skuteczną transformację energetyczną Polski, dla której elektrownie

jądrowe – przez oparcie energetyki na węglu i stosunkowo mały potencjał do produkcji odpowiedniej ilości energii odnawialnej – są jednym z niewielu rozwiązań kompatybilnych z rosnącym zapotrzebowaniem na energię, potrzebą niezależności energetycznej oraz polityką środowiskową Unii Europejskiej [8]. Mając to na uwadze, regulacje dotyczące procedury lokalizacyjnej planowanych elektrowni jądrowych – stanowiącej pierwszą i najistotniejszą część procesu inwestycyjnego – ze szczególnym uwzględnieniem nowości wniesionych przez nowelizację, zasługują na odpowiednie opracowania. Brakuje jednak prac, które kompleksowo odnoszą się do efektów nowelizacji, odpowiednio malując obraz nowego sposobu realizacji kluczowych etapów owej procedury – istniejące opracowania ograniczają się raczej do wybranych zagadnień, przedstawiając problem w sposób sfragmentyzowany [9]. Artykuł ten ma pomóc w wypełnieniu owej luki poprzez zebranie najważniejszych zmian dotyczących procedury lokalizacyjnej wprowadzonych w nowelizacji oraz opis i ocenę prawdopodobnych efektów tychże zmian na całość jej faktycznego przebiegu. Przy formułowaniu ocen niezbędne będą nawiązania do międzynarodowych standardów i zaleceń dotyczących licencjonowania obiektów jądrowych oraz do głosów pojawiających się w doktrynie. Czytelnik szybko zauważy, że znaczna część analizy jest poprowadzona niejako z perspektywy potencjalnego inwestora, co nie jest zabiegiem przypadkowym, bo to w końcu on będzie się mierzyć ze stawianymi wymaganiami, to jego ustawodawca chce zachęcić do inwestycji usprawnieniami procedur. Optymalizacja procedury lokalizacyjnej w sposób uwzględniający potrzeby inwestora i organów zaangażowanych w ten proces, a także prowadzący do polepszenia standardu ochrony bezpieczeństwa jądrowego w Polsce oraz respektujący konstytucyjne prawa i wolności obywateli jest celem, którego stopień realizacji w nowelizacji został oceniony przez autora w tym artykule.

Procedura przed nowelizacją

Dla zrozumienia całokształtu zmian wprowadzonych w nowelizacji konieczne będzie odtworzenie procedury lokalizacyjnej w poprzednim stanie prawnym. W jej świetle pierwszym krokiem było podjęcie się przez inwestora badań lokalizacyjnych (art. 35 b ust. 2 ustawy Prawo atomowe), na jakich podstawie możliwy był wybór i ocena terenu, na którym planowo miał być zlokalizowany obiekt jądrowy. Umożliwiało to sporządzenie (również przez inwestora) raportu lokalizacyjnego, podlegającego wyprzedzającej opinii Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki opisanej w art. 36a Prawa atomowego, koniecznej do uzyskania w przypadku obiektu energetyki jądrowej. Przejście do kolejnego etapu procedury wymagało również uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, którą w wypadku obiektu energetyki jądrowej wydawał General-

ny Dyrektor Ochrony Środowiska [10]. Raport, opinia Prezesa PAA oraz decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach, wraz z m.in. charakterystyką planowanego obiektu i wykazem nieruchomości objętych planowaną inwestycją, stanowią części składowe wniosku o uzyskanie decyzji o ustaleniu lokalizacji inwestycji w zakresie budowy obiektu energetyki jądrowej od właściwego miejscowo wojewody (art. 4-10a ustawy inwestycyjnej). We wniosku przewidziana była także konieczność uzyskania i zawarcia opinii licznych organów, których to opinie „zastępują uzgodnienia, pozwolenia, opinie, zgody bądź stanowiska właściwych organów, wymagane odrębnymi przepisami dla lokalizacji inwestycji”. Substytucja władczych form działania administracji formą niewładczą w postaci opinii spotyka się z krytyką wśród przedstawicieli doktryny [11], stanowi to natomiast pewne ułatwienie dla inwestora, którego wniosek teoretycznie może zostać pozytywnie rozpatrzony pomimo negatywnej opinii któregoś z organów.

Na podstawie uzyskanej decyzji o ustaleniu lokalizacji inwestor mógł się ubiegać o wydanie decyzji zasadniczej (regulowanej w uchylonym obecnie rozdziale 3 ustawy inwestycyjnej) przez ministra właściwego do spraw energii, który – po zasięgnięciu opinii szefa Agencji Bezpieczeństwa Wewnętrznego – mógł ją wydać lub odmówić jej wydania. Do wniosku w tej sprawie załączyć trzeba było, poza decyzją o ustaleniu lokalizacji, m.in. ogólną opinię Prezesa PAA dotyczącą „planowanych przez inwestora rozwiązań organizacyjno-technicznych”, o której mowa w art. 39b Prawa atomowego. Koniecznym krokiem do realizacji inwestycji (co wynika z art. 4 ust. 1 Prawa atomowego) było następnie uzyskanie wydawanego przez Prezesa PAA zezwolenia na budowę obiektu jądrowego. Szczegółowy opis procesu uzyskiwania tego zezwolenia mógłby być tematem osobnej pracy, dla inwestora wiąże się on z poświęceniem dużej ilości czasu i pieniędzy – za samo wydanie zezwolenia musi on zapłacić 5 mln złotych na konto Państwowej Agencji Atomistyki¹, a koszty przygotowania potrzebnej dokumentacji wielokrotnie przekraczają tę sumę. Szczegółowe wymagania wobec wniosku opisane były na poziomie rozporządzenia [12], obejmując m. in. przedstawienie raportu bezpieczeństwa, raportu lokalizacyjnego i decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, wraz z szeregiem innych raportów, opisów i decyzji. Dopiero po uzyskaniu zezwolenia na budowę obiektu energetyki jądrowej inwestor mógł wystąpić o wydanie pozwolenia na budowę regulowanego w ustawie Prawo budowlane [13] oraz w art. 15 i 16 ustawy inwestycyjnej. Wniosek musiał zawierać decyzję zasadniczą i zezwolenie na budowę obiektu jądrowego, a wydającą decyzję wojewodę wiązała wydana wcześniej decyzja o ustaleniu lokalizacji. Uzyskanie pozwolenia na budowę nie było ostatnim krokiem koniecznym do rozpoczęcia działalności przez elektrownię jądrową, wieńczyło ono jednak procedurę lokalizacyjną.

¹ Kwota ta wprawdzie ma być wpłacona na konto PAA, ale nie będzie stanowić dochodu Agencji, a dochód budżetu państwa.

Problemy procedury lokalizacyjnej

Opisana powyżej procedura była źródłem licznych problemów i spotkała się z krytyką w literaturze fachowej. Najbardziej rażąca jej wadę stanowiło umiejscowienie uzyskania decyzji zasadniczej na zaawansowanym etapie tego złożonego procesu. Ze względu na uznaniowy i *de facto* polityczny charakter jej wydania kosztowne działania podjęte w celu uzyskania poprzednich decyzji (m.in. przeprowadzenie badań koniecznych do sporządzenia raportu lokalizacyjnego) mogły się okazać bezowocne przez trudny do przewidzenia sprzeciw ze strony ministra. Taka kolejność niepotrzebnie podwyższała ryzyko inwestycyjne (i tak wysokie ze względu na naturę i skalę inwestycji w obiekty energetyki jądrowej), zniechęcając potencjalnych inwestorów. Nieefektywność w ograniczaniu niepewności inwestora nie objawiała się jednak wyłącznie w kwestii decyzji zasadniczej. Przedstawionemu porządkowi prawnemu brakowało skutecznych rozwiązań prelicencyjnych, umożliwiających inwestorowi uzyskanie informacji zwrotnej od organów zaangażowanych w proces uzyskiwania koniecznych decyzji przed jego właściwym rozpoczęciem. Opinie Prezesa PAA z art. 36a i 39b Prawa atomowego na gruncie samej tej ustawy jawią się jako tego rodzaju rozwiązania. W przypadku pierwszej, dotyczącej planowanej lokalizacji inwestycji, obligatoryjny charakter nadany jej w ustawie inwestycyjnej w odniesieniu do obiektów energetyki jądrowej jednocześnie pozbawiał swobody jej zakresu, co skutkuje – jak wskazuje Tomasz Nowacki – rozminięciem się z funkcją tej regulacji [14]. Istotą instrumentu prelicencyjnego powinna być możliwość, a nie konieczność jego zastosowania, i to w sposób możliwie dostosowany do potrzeb inwestora, aby narzędzie mające służyć pomocy nie stawało się dla niego dodatkowym obciążeniem. Swoboda zastosowania wydawała się ograniczona również w przypadku opinii dotyczącej planowanych przez inwestora rozwiązań organizacyjno-technicznych, przytoczonej w art. 39b Prawa atomowego, przynajmniej na etapie konieczności jej przedstawienia wraz z wnioskiem o wydanie decyzji zasadniczej. Ciężko bowiem przyjąć, żeby obligatoryjny element wniosku o decyzję mającą zabezpieczyć interesy państwa mógł być dowolnie kształtowany przez ubiegający się o nią podmiot – należałoby więc założyć, że opinia ta powinna dotyczyć całości planowanych przez inwestora rozwiązań, a to z kolei wydaje się dosyć problematyczne w tej fazie procedury. Swoją prelicencyjną funkcję opinia z art. 39b mogłaby za to stanowić w etapach poprzedzających ubieganie się o decyzję zasadniczą.

Złem koniecznym procedury lokalizacyjnej jest jej długość. Choć nie było jeszcze w Polsce przykładu pomyślnego zakończenia tejsze procedury, to w przypadku obecnie realizowanej przez spółkę Polskie Elektrownie Jądrowe inwestycji od rozpoczęcia badań środowiskowych do uzyskania decyzji zasadniczej (już na podstawie znoweli-

zowanej ustawy inwestycyjnej) dzieliło 6 lat, a kolejne miesiące przyniosły uzyskaną decyzję środowiskową i decyzję o ustaleniu lokalizacji [15]. Następne etapy realizacji inwestycji również wymagają znaczącej staranności, co przekłada się na wymóg ustanowienia odpowiednio liberalnych terminów na wydanie koniecznych decyzji przez zaangażowane organy. Nie ulega jednak wątpliwości, że wszelkie rozwiązania mogące ograniczyć beczyność inwestora, czy to poprzez skrócenie niektórych postępowań, czy przez umożliwienie mu podejmowania określonych prac na wcześniejszym etapie inwestycji są wartością dodaną, dopóki nie rzutują negatywnie na jakość realizacji owej inwestycji. Niejako symetrycznym problemem jest kosztowność procedury lokalizacyjnej elektrowni jądrowej. Przedsięwzięcie o tej skali z założenia będzie generowało milionowe koszty już na tym etapie realizacji inwestycji, co w dużej mierze związane jest z koniecznością zapewnienia odpowiednich standardów bezpieczeństwa. O ile potencjalny inwestor najprawdopodobniej zdaje sobie z tego sprawę, to z pewnością chętniej zlokalizuje swoją inwestycję w Polsce, jeśli procedura lokalizacyjna nie będzie zmuszać go do ponoszenia wydatków zbędnych, czy nawet pozwoli ograniczyć mu określone wydatki dzięki jej większej przejrzystości lub stworzeniu w jej ramach narzędzi pozwalających mu przeprowadzić niektóre czynności na bardziej dogodnych warunkach.

Zmiany dotyczące decyzji zasadniczej

Opis i ocenę zmian wprowadzonych w nowelizacji warto rozpocząć od poważnych różnic w uzyskiwaniu decyzji zasadniczej przez inwestora, uregulowanej obecnie w nowo utworzonym rozdziale 1a ustawy inwestycyjnej. W odróżnieniu od poprzedniego stanu prawnego inwestor nie musi już okazywać decyzji o ustaleniu lokalizacji inwestycji w zakresie budowy obiektu energetyki jądrowej, przeciwnie – to decyzja zasadnicza stanowi podstawę do ubiegania się przez inwestora o ustalenie lokalizacji owego obiektu. Konsekwencją tej zmiany jest to, że uzyskanie decyzji zasadniczej stało się jednym z pierwszych kroków procedury inwestycyjnej, likwidując tym samym jeden z jej najpoważniejszych mankamentów. Ponadto zmieniły się wymagania względem treści wniosku, m.in. dodano konieczność opisanie znaczenia inwestycji w ramach krajowego zapotrzebowania na energię lub ciepło. Zniknęły natomiast wymogi przedstawienia ogólnej opinii Prezesa PAA dotyczącej planowanych rozwiązań organizacyjno-technicznych z art. 39b Prawa atomowego oraz wykazania przez inwestora co najmniej rocznego doświadczenia w eksploatacji bloków energetycznych, jednocześnie umożliwiając aplikowanie inwestorom posiadającym siedzibę w państwie członkowskim OECD. Charakter wydania samej decyzji zasadniczej jednak się nie zmienił: choć przepisy rozdziału 1a wskazują przesłanki,

którymi powinien się kierować minister właściwy do spraw energii przy wydaniu lub odmowie jej wydania, to dalej wynik postępowania będzie zależny od przeświadczenia ministra o tym, jakie są „cele polityki państwa” i jak mają się do planowanej inwestycji. Na przeszkodzie uznaniowości nie staje także odebranie w nowelizacji możliwości złożenia wniosku o ponowne rozpatrzenie tej sprawy, a sam wnioskodawca w projekcie ustawy zaznacza, że zasadniczą funkcją istnienia decyzji zasadniczej jest „wyrażenie akceptacji politycznej państwa” wobec inwestycji. Warto jednak zauważyć, że udział naczelnych organów państwowych w procesie uzyskiwania pozwolenia na budowę elektrowni jądrowej jest powszechną praktyką w regulacjach międzynarodowych [16, 17], uzasadnioną odpowiedzialnością państwa za bezpieczeństwo energetyczne i fizyczne obywateli. Można natomiast zakwestionować zasadność pozostawienia tak istotnej gospodarczo i politycznie decyzji uznaniu jednoosobowego organu w postaci ministra właściwego ds. energii. Realizacja inwestycji z zakresu energetyki jądrowej jest w końcu wyzwaniem angażującym wiele obszarów działalności państwa, a potencjalnie oddana do użytku elektrownia jądrowa będzie wpływać na jego funkcjonowanie przez lata. Taka perspektywa skłaniałaby do uznania, że Rada Ministrów byłaby bardziej odpowiednim organem do wydania takiej decyzji albo że przynajmniej w ów proces powinno się włączyć więcej podmiotów, np. poprzez konieczność uzyskania zgody innych ministrów, chociażby ministra właściwego ds. administracji publicznej. Mimo to, w ocenie autora, treść tej decyzji (poniekąd z przyczyn podanych powyżej) i tak będzie w praktyce ustalana w porozumieniu z pozostałymi członkami Rady Ministrów niezależnie od obecnych uregulowań. Zmiana przepisów w tej sprawie byłaby więc bardziej kwestią dostosowania porządku prawnego do realiów decyzyjnych.

Z perspektywy interesu inwestora powyższe zmiany wydają się mimo wszystko korzystne. Przeszły porządek prawny utrzymywał inwestora w większej niepewności co do celowości przeznaczania środków finansowych i czasu na zdobycie zezwoleń koniecznych do późniejszego uzyskania decyzji zasadniczej, która z racji politycznego charakteru jej wydania w najmniejszym stopniu zależy od podmiotu zainteresowanego inwestycją. Umieszczenie owej decyzji na początku drabiny prawnej realizacji inwestycji, zalecane zresztą zarówno w polskiej [18], jak i zagranicznej literaturze fachowej [19], pozwala ograniczyć ten niepokój, odkładając bardziej merytoryczne formy oceny planów na później. Pozytywnie należy ocenić również poszerzenie puli podmiotów mogących się ubiegać o wydanie decyzji zasadniczej – arbitralnie wybrane przeciwwskazania, ograniczające zasób potencjalnych inwestorów (a w konsekwencji potencjalnych inwestycji) nie są konieczne przy wielostopniowej i długotrwałej procedurze, której głównym zadaniem jest właśnie dopuszczenie do realizacji wyłącznie projektów spełniających konieczne

standardy bezpieczeństwa energetycznego. Wychodząc poza zakres samego uzyskania decyzji zasadniczej, usunięcie wymagania uzyskania opinii Prezesa PAA z art. 39b Prawa atomowego czyni ją fakultatywną, co eliminuje wątpliwości dotyczące jej prelicencyjnego charakteru oraz zwalnia inwestora z konieczności kompletowania informacji trudnych do uzyskania na wczesnym etapie procedury. Ponadto, wprowadzono opłatę za wydanie owej opinii, co odpowiada na postulaty zgłaszane w doktrynie [14].

Zmiany dotyczące decyzji o ustaleniu lokalizacji

Zmiany w ustawie inwestycyjnej dotknęły decyzji lokalizacyjnej, nie tylko zmieniając jej zależność względem decyzji zasadniczej. Zgodnie z nowym brzmieniem art. 7 ust. 2. można ją obecnie wydać na maksymalnie 10 lat, w odróżnieniu od 5-letniego terminu sprzed nowelizacji. Jest to o tyle ważne, że w poprzednim stanie prawnym przedłużanie się postępowania o uzyskanie odpowiednich decyzji i zezwoleń mogło prowadzić do wygaśnięcia ważności owej decyzji przed możliwością dołączenia jej do wniosku o wydanie pozwolenia na budowę. Ponadto wyeliminowano konieczność przedstawienia raportu lokalizacyjnego wraz z wyprzedzającą opinią Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, początkowo zastępując ją wymaganiem uzyskania i przedłożenia opinii tego samego organu na temat wstępnego raportu lokalizacyjnego, nowo utworzonej instytucji prawnej. Zmiana ta zlikwidowała niespójność przepisów ustawy Prawo atomowe, która określała fakultatywność uzyskania opinii Prezesa PAA co do raportu lokalizacyjnego, z przepisami specustawy jądrowej klarownie stawiających ją jako konieczny element wniosku o decyzję lokalizacyjną. Minusem wprowadzonej konieczności przedstawienia dwóch bardzo podobnych do siebie raportów na dwóch różnych etapach realizacji inwestycji było jednak wymuszenie dublowania pracy inwestora oraz Prezesa PAA, bez widocznej korzyści dla prawidłowości ich ustaleń. Szczęśliwie, na podstawie nowelizacji z 13 lipca 2023 roku [20], wymaganym do uzyskania decyzji o ustaleniu lokalizacji przestał być także wstępny raport lokalizacyjny, czyniąc go fakultatywnym do opracowania w przebiegu procedury lokalizacyjnej. Na wydanie opinii w sprawie wstępnego raportu lokalizacyjnego Prezes PAA ma krótszy, bo czteromiesięczny termin (na opinię co do raportu lokalizacyjnego – sześciomiesięczny), a jej wydanie kosztuje inwestora 200 000 złotych. Co istotne, w ustawie nowelizującej brakuje wyjaśnienia, czym różni się proces sporządzania raportu wstępnego od niewstępnego, pozostawiając tę materię do rozstrzygnięcia na poziomie rozporządzenia. W rządowym projekcie owego aktu prawnego [21] można zauważyć znaczne podobieństwa między wstępnym i niewstępnym raportem lokalizacyjnym, niemniej, ze względu na nieobligatoryjny charakter spo-

urządzenia wstępnego raportu lokalizacyjnego i jego użyteczność na wczesnym etapie realizacji inwestycji, od inwestora wymagane jest mniej informacji, dotyczących w szczególności projektu planowanego obiektu energetyki jądrowej. Uzyskanie opinii Prezesa PAA nt. opracowanego wstępnego raportu lokalizacyjnego będzie więc służyło ograniczeniu niepewności inwestora co do dopuszczalności lokalizacji elektrowni jądrowej na terenie nim objętym, bez konieczności uwzględniania szczegółowych danych technicznych na etapie inwestycji, na którym niekoniecznie została wybrana konkretna technologia jądrowa.

Decyzja o ustaleniu lokalizacji po nowelizacji przejmuje część skutków, które przed nowelizacją wywoływała decyzja zasadnicza, m.in. możliwość wnioskowania o ustanowienie użytkownika wieczystego oraz przeniesienie własności na rzecz inwestora, co wynika z przesunięcia decyzji zasadniczej na początek drabiny inwestycyjnej. Ponadto, zgodnie z nowo wprowadzonymi ustępami 1a i 1b w art. 8 ustawy inwestycyjnej, nabywcy nieruchomości objętych wnioskiem o wydanie decyzji lokalizacyjnej muszą zgłosić swoje dane wydającemu decyzję organowi – brak takiego zgłoszenia i związany z tym brak udziału nowego właściciela w postępowaniu o wydanie decyzji lokalizacyjnej nie wpłyną obecnie na ważność wydanej decyzji. Na proces uzyskania decyzji o ustaleniu lokalizacji efekt wywrą także zmiany dotyczące wydania decyzji o wskazaniu lokalizacji inwestycji i zezwolenia na wejście na teren nieruchomości z art. 11 ustawy inwestycyjnej. Wskazane powyżej instrumenty prawne umożliwiają przeprowadzenie badań lokalizacyjnych oraz – po nowelizacji – badań środowiskowych na terenie cudzej nieruchomości. Wymaganie „ogólnej charakterystyki planowanej inwestycji” zastąpiono w art. 11 ust. 4 ustawy inwestycyjnej potrzebą określenia „rodzaju obiektu energetyki jądrowej”, co obniża ilość koniecznych do zawarcia informacji w celu uzyskania decyzji o wskazaniu lokalizacji od wojewody, często niemożliwych do zdobycia na wczesnym etapie inwestycji. Wyłączono także stosowanie przepisów ustawy o ochronie gruntów rolnych i leśnych [22] dla wspomnianej decyzji, wzmacniając pozycję inwestora przed uzyskaniem decyzji o ustaleniu lokalizacji.

Wprowadzone w nowelizacji zmiany dotyczące uzyskania decyzji o ustaleniu lokalizacji są – w przekonaniu autora – zasadniczo trafione. Szczególnie pozytywnie należy ocenić ułatwienia w przeprowadzaniu badań lokalizacyjnych i środowiskowych, które nie tylko stanowią udogodnienie dla inwestora, ale także mogą się przyczynić do zwiększenia jakości wykonanych na ich podstawie raportów, co leży w interesie publicznym. Trudne do uzasadnienia ukształtowanie instytucji wstępnego raportu lokalizacyjnego jako koniecznego do sporządzenia zostało skorygowane zmianami w ustawie z 13 lipca 2023 roku. Możliwość uzyskania opinii Prezesa PAA nt. raportu będzie stanowić pomocniczy instrument w walce

z ograniczaniem ryzyka inwestycyjnego po stronie inwestora, którego użyteczność zweryfikuje praktyka.

Zmiany w finalnej fazie procedury lokalizacyjnej

Postępowanie w sprawie wydania zezwolenia na budowę obiektu jądrowego przez Prezesa PAA wymaga znaczącego nakładu czasu i środków ze względu na to, że właśnie poprzez wydanie tego zezwolenia inwestor dostaje zielone światło od organu dozoru jądrowego w zakresie wszystkich najważniejszych elementów planowanej inwestycji. Wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego z odpowiednim udziałem niezależnego organu dozoru jądrowego jest kluczowym elementem w realizacji podstawowych zasad prawa energetyki jądrowej, takich jak zasada bezpieczeństwa czy zasada posiadania zezwolenia [23], błędem byłoby więc skracanie 24-miesięcznego terminu na wydanie zezwolenia, jeśli miałyby się wiązać z obniżeniem jakości dokonanych przez PAA badań i analiz. Rozwiązaniem mającym zmniejszyć dokuczliwość długiego terminu wydawania zezwolenia jest umożliwienie wystąpienia do wojewody o pozwolenie na budowę jeszcze bez wydanego zezwolenia na budowę przez Prezesa PAA – zezwolenie to musi jednak być złożone w trakcie postępowania. Zmiana ta, zawarta w zmienionym art. 39k Prawa atomowego, umożliwia jednoczesne procedowanie zezwolenia i pozwolenia. W celu zapewnienia wojewodzie odpowiedniego poziomu wiedzy na temat trwającego postępowania o uzyskanie zezwolenia, potrzebnego, by zapewnić faktyczną możliwość symultanicznego trwania obu postępowań, w nowym art. 39ka Prawa atomowego nałożono na Prezesa PAA obowiązek poinformowania go o wszczęciu postępowania oraz przekazania kopii koniecznych do tego dokumentów. Uregulowano również tryb ponoszenia przez wnioskodawcę czynności koniecznych do wydania zezwolenia, takich jak opłacenie wykonania badań i ekspertyz w art. 39e ust. 2a-2e tej samej ustawy.

Choć nie dotyczy to bezpośrednio procesu lokalizacyjnego, to warto w tym miejscu zaznaczyć, że w nowelizacji wyłączono możliwość dyskrejonalnego odwołania wiceprezesów PAA przez ministra właściwego ds. klimatu oraz przywrócono Prezesowi PAA wyłączne prawo do wyboru członków Rady Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej (zmiany w art. 109 i 112 Prawa atomowego), odnosząc się w ten sposób do krytyki przedstawionej w literaturze fachowej [24]. Wzmocnia to niezależność Prezesa PAA od ministra ds. klimatu, pozwalając jemu i kierowanej przez niego Agencji na operowanie w zgodzie ze standardami wyznaczonymi przez IAEA [25], ograniczając presję polityczną mogącą wpływać na jakość procesu decyzyjnego organu. Należy więc pokładać nadzieję, że zmiana ta doprowadzi do zwiększenia społecznego zaufania do tego organu dozoru jądrowego oraz efektyw-

ności jego pracy, której rezultaty inwestor zobaczy szybciej, dzięki zmianom opisanym w poprzednim akapicie.

Zmiany definicyjne

Nowelizacja nie ominęła zbioru definicji legalnych ustawy inwestycyjnej i Prawa atomowego. Rozszerzona została grupa obiektów kwalifikujących się do kategorii inwestycji towarzyszących – nowe brzmienie art. 2 ust. 1 ustawy inwestycyjnej uwzględnia wśród nich szereg inwestycji koniecznych infrastrukturalnie do funkcjonowania obiektu energetyki jądrowej, a także tych, które są niezbędne w celu budowy obiektu lub do sporządzenia wstępnego raportu lokalizacyjnego, raportu lokalizacyjnego i raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko. Warto zauważyć, że to cel inwestycji jest kluczowym wyznacznikiem jej kwalifikacji, pozostawiając inwestorowi dużą swobodę w zakresie technicznej realizacji tego celu w ramach inwestycji. Takie rozwiązanie należy ocenić pozytywnie – w świetle licznych wymagań formalnych i materialnych stawianych przed inwestorem narzucanie sposobów ich spełnienia ograniczałoby innowacyjność i skuteczność jego działań, a kontrolę wobec potencjalnych nadużyć inwestora sprawuje minister właściwy do spraw energii, który na wniosek inwestora nadaje status inwestycji towarzyszącej, zgodnie z art. 52 ust. 1 ustawy inwestycyjnej. Dzięki takiemu statusowi w realizacji inwestycji towarzyszącej skorzystać można z części rozwiązań prawnych przysługujących inwestycji głównej, co ułatwia jej sfinalizowanie. Problemem, który istniał także w poprzednim stanie prawnym, a który pogłębia rozszerzenie definicji inwestycji towarzyszącej, jest brak rozwiązań prawnych co do statusu już powstałej inwestycji towarzyszącej w razie prawnej niemożliwości zrealizowania właściwej inwestycji, na co słusznie zwrócił uwagę Dubiński [26]. Sprawia to, że nie ma skutecznych środków na m.in. przywrócenie własności poprzednim właścicielom nieruchomości objętych taką inwestycją.

Wprowadzone zostały także nowe definicje, takie jak definicja elektrowni jądrowej w art. 3 pkt 6f Prawa atomowego, rozwiewająca wątpliwości co do kwalifikacji reaktorów jądrowych produkujących głównie ciepło jako elektrownie jądrowe, czy też definicje inwestycji w zakresie budowy obiektu energetyki jądrowej i infrastruktury niezbędnej do obsługi zawarte w art. 2 pkt. 1a i 1b ustawy inwestycyjnej, które porządkują przedmiotowy zakres obowiązywania przepisów ustawy.

Dodatkowe ułatwienia dla inwestorów

Nowelizacja obejmuje także kilka mniejszych zmian, wspomagających inwestora na różnych etapach procedury lokalizacyjnej. Ułatwione zostało złożenie wniosku

o uzyskanie pozwolenia na prace przygotowawcze poprzez usunięcie z art. 17 ust. 2 ustawy inwestycyjnej wymagania załączenia opinii Prezesa PAA z art. 36a Prawa atomowego, co jednocześnie eliminuje wspomnianą już nieśpójność dotyczącą fakultatywności owej opinii. Zmiana ta – a także umożliwienie w późniejszej nowelizacji z 13 lipca, by rzeczona opinia mogła zakresem obejmować wybrane, niekoniecznie wszystkie, aspekty lokalizacji elektrowni atomowej – przekształciły tę instytucję w faktycznie skuteczny instrument prelicencyjny. Zbiór możliwych do podjęcia prac przygotowawczych został poszerzony w art. 17 ust. 1 ustawy inwestycyjnej, obejmując obecnie także prace geodezyjne, wzniesienie tymczasowego ogrodzenia i włączenie dróg tymczasowych do dróg publicznych, co oczywiście poszerza w pewnym stopniu możliwości wykonania pierwszych prac w oczekiwaniu na pozwolenie na budowę oraz ułatwia zabezpieczenie terenu inwestycji. Zmianą o prawdopodobnie większym znaczeniu dla inwestora jest wprowadzenie art. 21a ustawy inwestycyjnej, który nakłada na szereg podmiotów, takich jak organy administracji publicznej czy nadzorowane przez nie oraz podległe im jednostki organizacyjne, obowiązek nieodpłatnego udostępnienia inwestorowi informacji potrzebnych do realizacji zadań związanych z inwestycją. Wniosek w tej sprawie składa się za pośrednictwem ministra właściwego ds. energii, a niedookreśloną kategorię „niezbędnych” informacji sprecyzować ma rozporządzenie Rady Ministrów. Rozwiązanie to należy ocenić pozytywnie – realizacja inwestycji w postaci obiektu energetyki jądrowej wiąże się z licznymi obowiązkami ciężącymi na podmiocie podejmującym się tego wyzwania, a prawidłowa ich realizacja leży także w interesie państwa, szczególnie że w wielu wypadkach tego rodzaju inwestycje mają kluczowe znaczenie z perspektywy założeń polityki energetycznej [27]. Potencjalne zagrożenia związane z udostępnieniem owych informacji inwestorowi będą ograniczone regulacją na poziomie rozporządzenia, zabezpieczając przed nadużyciami.

Proporcjonalna nie wydaje się natomiast zmiana wprowadzona w art. 34, wyłączająca zastosowanie art. 9 ustawy o gospodarce nieruchomościami [28] wobec inwestycji w zakresie budowy obiektu jądrowego. Pozbawia to właściciela nieruchomości, na której ma być lokalizowana inwestycja, ochrony w postaci wstrzymania wykonalności m.in. decyzji wywłaszczeniowej w przypadku wniesienia na nią skargi administracyjnej. Należy zauważyć, że własność jest szczególnie chronioną wartością w świetle art. 64 Konstytucji RP, a konsekwencje wykonania decyzji wywłaszczeniowej mogą być trudne do odwrócenia. Nadanie inwestorowi takiej formy preferencyjnego traktowania bez ograniczenia jej, na przykład, koniecznością wykazania, że zwłoka w wykonaniu tej decyzji uniemożliwiłaby realizację inwestycji, nie jest konieczne, tym samym nie spełniając, w przekonaniu autora, konstytucyjnej zasady proporcjonalności [29].

Podsumowanie

Zasadniczy kierunek zmian wprowadzonych przez nowelizację wobec procedury lokalizacyjnej należy ocenić pozytywnie. Decyzja zasadnicza, teraz umiejscowiona na początku drabiny inwestycyjnej, nie uderza już swoim uznaniowym i politycznym charakterem w pewność inwestora co do celowości przeznaczanych przez niego środków. Umożliwienie równoległego prowadzenia większej liczby postępowań pozwala na oszczędzenie czasu na poszczególnych etapach procedury, jednocześnie nie wpływając negatywnie na jakość ich przeprowadzenia. W połączeniu ze zwiększeniem swobody interakcji inwestora z podmiotami administracji publicznej i rewitalizacją instrumentów prelicencyjnych ustawodawca wykreował znacząco przyjazniejsze środowisko inwestycyjne, które ma szansę na przyciągnięcie kapitału zagranicznego. Koszty uzyskania tego efektu nie są ponadto nadmiernie uciążliwe dla organów biorących udział w odpowiednich postępowaniach, a wielokrotnie wiążą się ze znaczącymi oszczędnościami po stronie inwestora. Ponadto, zwiększenie niezależności Prezesa PAA oraz powiązanych z nim podmiotów pozwala mu wyjść z cienia politycznej kontroli, mogącej toksycznie wpływać na efektywność wypełniania swoich kompetencji, a rozwianie części wątpliwości definicyjnych i uporządkowanie m.in. zasad opłacania badań związanych z wydaniem zezwolenia na budowę obiektu jądrowego przekłada się na większe zrozumienie procesu lokalizacyjnego przez wszystkich zainteresowanych. Wszystkie te pozytywy składają się ostatecznie na odnowiony mechanizm lokalizacji inwestycji jądrowej, który nie stanowi rewolucji w zakresie licencjonowania działalności elektrowni jądrowych w Polsce, ale jest kontynuacją tych samych założeń bazowych w formie zoptymalizowanej względem poprzedniego stanu prawnego. Można więc założyć, że dzięki zmianom wprowadzonym w nowelizacji szansa na zakończenie procedury lokalizacyjnej wydaniem pozwolenia na budowę odpowiedniemu inwestorowi wzrosła. Istotne jest jednak dostrzeżenie, że w dążeniu do usatysfakcjonowania potencjalnego inwestora ustawodawca częściowo zignorował interesy osób, które ze względu na realizację inwestycji z zakresu energii jądrowej muszą się liczyć z utratą prawa własności lub innych praw związanych z nieruchomościami, co – pomijając oczywistą szkodę po stronie tych osób – może także negatywnie rzutować na społeczną percepcję realizacji takich inwestycji w skrajnych przypadkach nadużycia pozycji inwestora.

Podziękowania

Autor dziękuje Panu Doktorowi Aleksandrowi Jakubowskiemu za pomoc w ukierunkowaniu pracy i wartościowe zajęcia z prawa administracyjnego oraz Panu Doktorowi Tomaszowi Nowackiemu za zainteresowanie się artykułem i cenne merytoryczne wskazówki.

Notka o autorze

Antoni Badora jest studentem Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Warszawskiego.

Bibliografia

1. Ustawa z dnia 29 czerwca 2011 r. o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (tj. Dz.U. z 2021 poz. 1484 z późn. zm.).
2. Ustawa z dnia 9 marca 2023 r. o zmianie ustawy o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. z 2023 poz. 595).
3. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (tj. Dz.U. z 2022 poz. 974 z późn. zm.).
4. Nowacki T. R., *Nuclear Power on the Vistula River Law and Policy in Shaping Energy Future of Poland*, Prawo i Więzy, vol. 9, nr 3 (33), 2020, s. 182–208.
5. Kielbasa W., *Co zrobiono dotychczas i co trzeba zrobić, aby w Polsce powstała pierwsza elektrownia jądrowa (Część I)*, Postępy Techniki Jądrowej, vol. 57, nr 3, 2014, s. 2–13.
6. <https://isbiznes.pl/2022/10/31/morawiecki-powstana-trzy-elektrownie-jadrowe-jedna-z-nich-w-koni/> (dostęp: 24.01.2024).
7. <https://www.gov.pl/web/klimat/rekordowe-poparcie-86-polakow-za-budowa-elektrowni-jadrowych-w-polsce> (dostęp: 24.01.2024).
8. Bojarczyk B., Olchowski J., *Energetyka jądrowa w kontekście bezpieczeństwa energetycznego Polski*, Teka Komisji Politologii i Stosunków Międzynarodowych, nr 9, 2014, s. 7–32.
9. Dubiński Ł., *Specustawa jądrowa i prawo atomowe (ocena wybranych planów legislacyjnych)*, internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny, vol. 11, nr 2, 2022, s. 84–91.
10. Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (tj. Dz.U. z 2023 poz. 1094), art. 72–75.
11. Czech M., Karolina Z., *Prawne i faktyczne uwarunkowania procedury lokalizacji elektrowni jądrowych w Polsce*, Przegląd Prawa Ochrony Środowiska, vol. 7, nr 3, 2015, s. 151–170.
12. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 sierpnia 2021 r. w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz. U. 2021 poz. 1667).
13. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (tj. Dz. U. 2023 poz. 682).
14. Nowacki T. R., *Opinie Prezesa PAA, o których mowa w art. 36a i 39b ustawy – Prawo atomowe jako przykład prelicencjonowania obiektów jądrowych*, Studia Iuridica, vol. 87, 2021, s. 388–411.
15. <https://www.money.pl/gospodarka/ministerstwo-klimatu-o-atomie-na-pomorzu-decyzja-jest-ostateczna.html> (dostęp: 24.01.2024).
16. Locatelli G., Mancini M., Sainati T., Sallinen L., *The licensing processes influence on nuclear market*, Chiba 2011.
17. Nowacki T. R., *Budowa obiektów energetyki jądrowej* [w:] Wąlaszek-Pyziół A. (red.), *Wybrane węzłowe zagadnienia współczesnego prawa energetycznego*, Kraków 2012, s. 195–217.
18. Młynarkiewicz Ł., *Decyzja zasadnicza w procesie przygotowania i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej*, Arche, Sopot 2020.
19. Bowden P., Nick K. S., Raetzke C., Thiele L., *Regulation, licensing and oversight of nuclear activities*, [w:] Burns S. G., Nick K. S. (red.), *Principles and Practice of International Nuclear Law*, Paryż 2022, s. 167–210.
20. Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o zmianie ustawy o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko oraz niektórych innych ustaw (Dz. U. 2023 poz. 1890).
21. <https://legislacja.rcl.gov.pl/projekt/12377102/katalog/13007016#13007016> (dostęp: 24.01.2024).

22. Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów rolnych i leśnych (tj. Dz. U. 2022 poz. 2409).
23. Baer A., Pelzer N., Stoiber C., Tonhauser W., *Handbook on Nuclear Law*, Wiedeń 2003.
24. Nowacki T. R., *O potrzebie przywrócenia właściwego statusu Radzie do spraw Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej*, *Krytyka Prawa*, vol. 13, nr 3, 2021, s. 255–275.
25. IAEA, *Organization, Management and Staffing of the Regulatory Body for Safety*, *IAEA Safety Standards Series No. GSG-12*, Wiedeń 2018.
26. Dubiński Ł., *Projektowane zmiany w definicji tzw. inwestycji towarzyszących*, *Nowa Energia*, nr 1, 2022, s. 74–76.
27. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r. (*Monitor Polski* 2021, poz. 264).
28. Ustawa z dnia 21 sierpnia 1997 r. o gospodarce nieruchomościami (tj. Dz. U. 2023 poz. 344).
29. Folać Ł., *Zasada proporcjonalności w tworzeniu prawa administracyjnego*, *Ruch Prawniczy, Ekonomiczny i Socjologiczny*, vol. 79, zeszyt 4, 2017, s. 57–71.

Częstość aberracji u zdrowych dawców – wartość istotna dla monitoringu populacji w trakcie rozwoju energetyki jądrowej

Baseline frequency of aberrations in healthy donors – an important value for population monitoring during the development of nuclear energy

Sylwester Sommer, Katarzyna Sikorska
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie

Streszczenie: W związku z planami rozwoju energetyki jądrowej w Polsce, w sytuacji kiedy grupy osób mieszkające w przyszłości wokół obiektów jądrowych mogą mieć nieuzasadnione wątpliwości dotyczące ich własnego bezpieczeństwa, a przyszli pracownicy elektrowni będą potencjalnie narażeni na niskie, powtarzające się dawki promieniowania jonizującego, istotne wydaje się rozwijanie metod cytogenetycznych, pokazujących genotoksyczne efekty oddziaływania środowiska (w tym środowiska pracy). W dalszym ciągu metoda analizy częstości aberracji chromosomowych (i chromatydowych) w limfocytach krwi obwodowej pozostaje jedną z najważniejszych możliwości badania wpływu genotoksycznego otoczenia, w szczególności narażenia na promieniowanie jonizujące. Aby efektywnie badać niewielkie zmiany w częstościach aberracji u osób narażonych na promieniowanie, potrzebne są badania bazowych częstości aberracji w różnych nienarażonych na promieniowanie populacjach. W Polsce takie badania, na większą skalę, zostały przeprowadzone tylko raz, ponad 20 lat temu na Śląsku. Istnieje potrzeba ponownego stworzenia bazy danych częstości aberracji u zdrowych dawców na podstawie analizy preparatów za pomocą zmotoryzowanego mikroskopu i systemu do analizy obrazu Metasystems. Taka baza danych pozwoli na ocenę wpływu genotoksycznego lokowanych obiektów jądrowych, oddziaływania radonu na obszarach o jego podwyższonym stężeniu bądź wpływu środowiska pracy, np. pracowników medycznych pracujących z promieniowaniem czy pracowników przemysłu jądrowego.

Słowa kluczowe: Aberracje chromosomowe, narażenie na promieniowanie jonizujące, częstość aberracji u zdrowych dawców, bazowa częstość aberracji, narażenie na promieniowanie w energetyce jądrowej, genotoksyczny efekt promieniowania jonizującego, FISH (*fluorescence in situ hybridisation*).

Abstract: Due to the plans of development of nuclear power plants in Poland, in situation where groups of people living in the future around nuclear facilities may have unjustified doubts about their own radiation safety, and when future power plant workers will be potentially exposed to low, cumulative doses of ionizing radiation, it seems important to develop cytogenetic methods showing genotoxic effects of environmental influences (including the work environment). The method of analyzing the frequency of chromosomal (and chromatid) aberrations in peripheral blood lymphocytes remains one of the most important possibilities for examining the impact of the genotoxic environment, in particular exposure to ionizing radiation. To effectively explore small changes in aberration frequencies, studies of aberration frequencies in healthy donors from different populations are needed. In Poland, such research on a large scale was conducted only once, over 20 years ago in Silesia. There is a need to create a database of baseline aberrations, based on the analysis of slides using a motorized microscope and the Metasystems image analysis system. Such a database will allow for the assessment of the genotoxic impact of located nuclear facilities, the impact of radon in areas with its increased concentration, or the impact of the working environment, for example, medical workers working with radiation or employees of the nuclear industry.

Keywords: Chromosomal aberrations, ionising radiation exposure, aberration frequencies of healthy donors of different population, baseline aberration frequency, ionising radiation exposure in nuclear power energy industry, genotoxic effect of ionising radiation, FISH (*fluorescence in situ hybridisation*).

Wstęp

Rozwój energetyki jądrowej w Polsce spowoduje, że duże grupy osób będą potencjalnie narażone na niskie dawki promieniowania jonizującego: pracownicy obiektów jądrowych – na niskie dawki związane z rutynową pracą i na ryzyko (wysokich) dawek awaryjnych, osoby mieszkające w okolicy elektrowni na niskie (zaniedbywalne) dawki związane z pracą elektrowni. Dlatego istotną rzeczą jest wypracowanie metod, które mogłyby szacować genotoksyczne działanie promieniowania na komórki ludzkie. W dalszym ciągu metodą z wyboru, najlepiej opisaną, zwalidowaną i najbardziej czułą pozostaje analiza częstości aberracji w limfocytach krwi obwodowej [1, 2]. Istnieją również inne metody pomocne przy określaniu efektu genotoksycznego, takie jak: różne rodzaje testu mikrojądrowego, test kometowy, analiza wymian chromatyd siostrzanych i inne, jednak w poniższym artykule nie będą one omawiane [2].

Przy narażeniu na niskie dawki promieniowania możliwe są trzy metody analizy aberracji: standardowe barwienie FPG (*Fluorescence + Giemsa*) (rys. 1), droższa analiza translokacji za pomocą malowania chromosomów (zazwyczaj 2 lub 3 pary chromosomów homologicznych) (rys. 4) i najdroższa – malowanie wszystkich chromosomów, używając techniki m-FISH (rys. 5). Wszystkie trzy metody mają zarówno zalety, jak i wady, które zostaną dokładniej opisane w dalszej części artykułu. Metoda barwienia FPG jest najprostsza i najmniej kosztowana. Przy jej użyciu można rozpoznawać szereg różnych aberracji: chromosomy dicentryczne, dodatkowe fragmenty acentryczne, niektóre aberracje chromatydowe, natomiast nie można analizować częstości translokacji. Malowanie od jednej do kilku par chromosomów (m-FISH), oprócz wszystkich typów aberracji możliwych do analizy za pomocą metody FPG, pozwala sprawdzić częstość translokacji i aberracji kompleksowych w pomalowanej części genomu. Jest to metoda droższa niż barwienie FPG, ponieważ wymaga zakupu sond fluorescencyjnych i użycia mikroskopu fluorescencyjnego. Technika m-FISH, jako bardziej precyzyjna metoda, pozwala na wyznakowanie sondami wszystkich chromosomów i analizę częstości translokacji i aberracji kompleksowych w całym genomie.

Wszystkie wyżej wymienione metody porównują znalezione częstości aberracji z częstościami uzyskanymi w komórkach od dawców kontrolnych. O ile przy wyższych dawkach promieniowania częstości aberracji wielokrotnie przewyższają wartości kontrolne, o tyle przy niskich dawkach są do wartości kontrolnych zbliżone. Otwartym pytaniem pozostaje, jakie znaczenie mają te niewiele podwyższone częstości aberracji. Nie ma w tym obszarze konsensusu wśród badaczy, a publikowane wyniki badań epidemiologicznych zapadalności na nowotwory, czy choroby układu krążenia w populacjach osób pracujących z promieniowaniem, czy zamieszkałych na terenach o podwyższonym stężeniu radonu są sprzeczne ze sobą.

Aby opisać genotoksyczny efekt niskich dawek promieniowania, istotne jest porównanie badanej grupy (kohorty) z bazą zdrowych dawców z ogółu populacji. Baza taka powinna być odpowiednio liczna i uwzględniać szereg czynników, takich jak wiek dawców, płeć, palenie papierosów czy zróżnicowanie geograficzne i etniczne oraz inne czynniki. Bazy takie są tworzone przez laboratoria zajmujące się genetycznymi skutkami promieniowania, np. powstawały w wyniku międzynarodowych projektów naukowych, a ostatnio publikowane są dane z poszczególnych krajów. Wydaje się, że w Polsce wartościowa baza danych aberracji u dawców kontrolnych powstała tylko raz, 25 lat temu na Śląsku. Biorąc pod uwagę rozwój energetyki jądrowej, a także wykorzystanie do analizy zmotoryzowanych mikroskopów sprzężonych z kamerami CCD (*charge-coupled device*) o wysokiej rozdzielczości, co daje lepsze możliwości analityczne, pożądanym byłoby, aby taka baza danych powstała w naszym kraju obecnie.

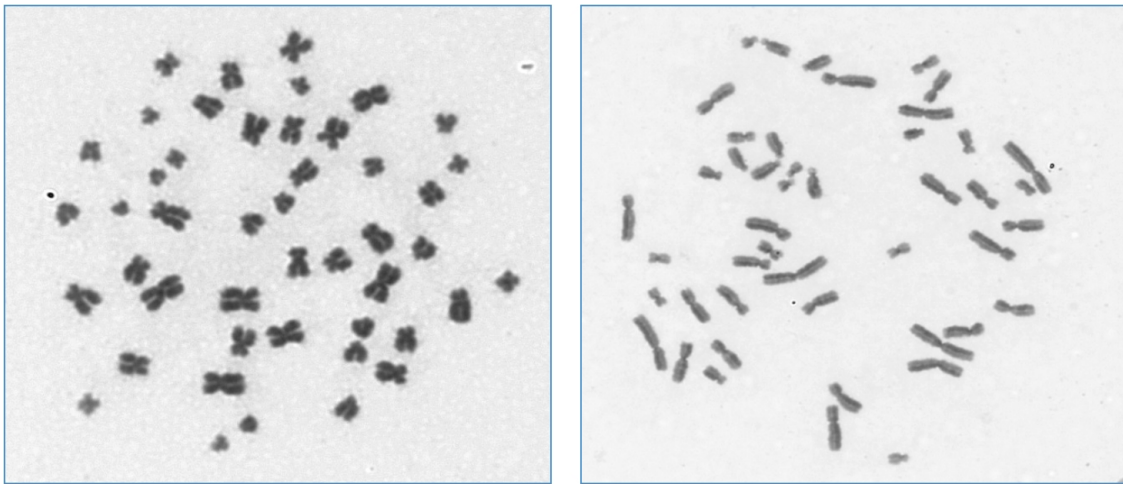
Techniki cytogenetyczne pozwalające na śledzenie efektów genotoksycznych mogą być wykorzystane do analizy wpływu nie tylko niskich dawek promieniowania pochodzących z energetyki jądrowej, ale również oddziaływania radonu (czy radu, uranu) na obszarach o jego podwyższonym stężeniu, wpływu środowiska pracy na np. pracowników medycznych pracujących z promieniowaniem czy wpływu zanieczyszczenia środowiska na ogólną populację. Pamiętajmy, że podwyższona częstość aberracji to cecha komórek nowotworowych, a u osób z nowotworami podwyższone częstości aberracji wykrywa się także w limfocytach krwi obwodowej, nie będących komórkami nowotworowymi.

1. Metody badania częstości aberracji używane w monitoringu populacji oraz rodzaje aberracji

1.1. Barwienie chromosomów za pomocą barwnika Giemsy

Standardową metodą barwienia preparatów do oceny częstości aberracji jest barwienie za pomocą barwnika Giemsy. Jest to metoda szeroko opisana i znormalizowana [1, 3]. Do standardowej hodowli limfocytów dodaje się dodatkowo analog tymidyny BrdU, który wbudowuje się do replikowanej nici DNA, umożliwiając barwienie FPG [4]. Barwienie FPG pozwala na rozróżnianie pierwszych podziałów mitotycznych po stymulacji limfocytów do podziału od następnych podziałów (rys. 1).

Barwienie metodą Giemsy (FPG) jest najczęściej wybieranym barwieniem chromosomów, ponieważ jest łatwe i tanie. Pozwala ono analizować częstości różnych aberracji, zarówno chromosomowych (głównie niestabilnych), jak i chromatydowych. W badaniach genotoksyczności nie bierze się pod uwagę wszystkich typów aberracji, ponieważ niektóre z nich są zbyt skomplikowane, trudne do rozpoznania i/lub bardzo rzadko spotykane. Dokładny opis

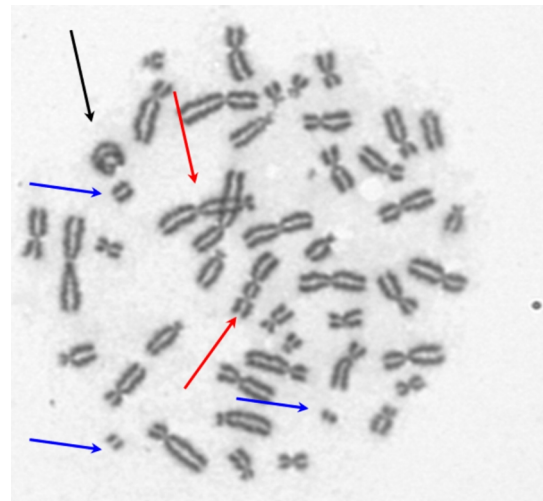


Rys. 1. Nieuszkodzone limfocyty w trakcie mitozy – barwienie FPG. Widoczne chromosomy bez zmian morfologicznych. Zdjęcie z lewej strony przedstawia materiał genetyczny komórki w trakcie pierwszej mitozy po stymulacji limfocytów do podziału – chromosomy jednakowo wybarwione, a zdjęcie z prawej strony obrazuje chromosomy w trakcie drugiego podziału po stymulacji limfocytów – chromatydy zróżnicowane.

Fig. 1. Undamaged human lymphocyte in mitosis – FPG staining. Chromosomes are without any morphological changes. Left panel shows uniformly stained chromosomes, in first mitosis after the stimulation of cells for division. Right panel shows chromosomes in second mitosis following division stimulation – chromatids are differentially stained (Harlequin chromosomes).

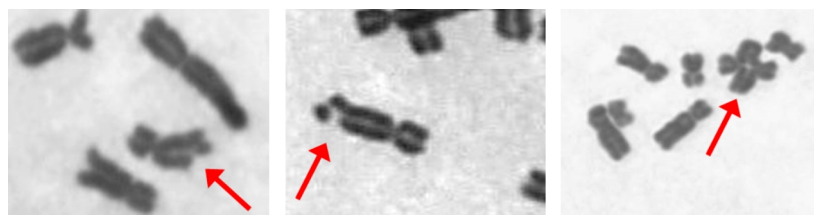
wszystkich typów aberracji zawarty jest w następujących publikacjach: *Classification and relationships of induced chromosomal structural changes* (Savage 1975), „*Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies*”, *EPR-Biodosimetry* (IAEA 2011) czy *Mechanisms of clastogen-induced chromosomal aberrations: A critical review and description of a model based on failures of tethering of DNA strand ends to strand-breaking enzymes* (Bignold 2009) [1, 5, 6].

W przypadku analizy komórek kontrolnych i badania wpływu genotoksycznego środowiska czy środowiska pracy analizuje się tylko kilka rodzajów aberracji, często łącząc je w grupy. Zazwyczaj analizuje się częstość aberracji chromosomowych niestabilnych, takich jak chromosomy dicentryczne, pierścienie centryczne i dodatkowe fragmenty acentryczne (aberracje widoczne na rys. 2) [7, 8, 9]. Dodatkowo niektórzy badacze liczą częstości translokacji, w przypadku kiedy są one widoczne (większość translokacji jest nierozpoznawalna przy barwieniu metodą Giemsy) [7, 9]. Oprócz aberracji chromosomowych analizuje się aberracje chromatydowe, takie jak pęknięcia chromatydowe czy wymiany chromatydowe (rys. 3). Do analizy statystycznej wszystkie rodzaje aberracji są łączone w jedną grupę lub osobno analizuje się aberracje chromosomowe i aberracje chromatydowe.



Rys. 2. Aberracje chromosomowe w limfocycie poddanym napromienieniu promieniowaniem jonizującym. Strzałkami zostały oznaczone aberracje: czerwonymi – chromosomy dicentryczne i czarną – pierścień centryczny. Niebieskimi strzałkami oznaczono fragmenty acentryczne, które w tej konkretnej komórce są fragmentami innych aberracji.

Fig. 2. Different structural chromosomal aberration in human lymphocytes irradiated with ionising radiation. Different types of aberrations were pointed with the arrows: red arrows – dicentric chromosomes, black arrow – centric ring. Acentric fragments which, in this situation are parts of other aberrations (they accompany dicentric chromosomes and centric ring) were pointed with blue arrows.



Rys. 3. Aberracje chromatydowe w limfocycie krwi obwodowej. Dwa zdjęcia z lewej strony pokazują pęknięcia chromatydowe. Zdjęcie z prawej strony przedstawia wymianę chromatydową (kompletna symetryczna wymiana chromatydowa) [1, 5].

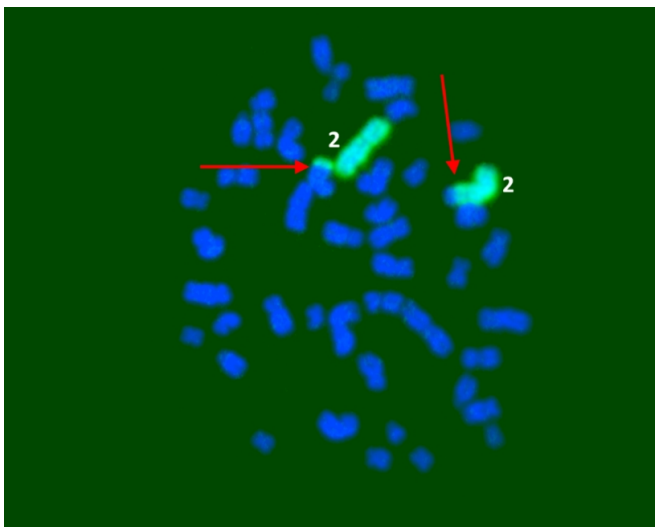
Fig. 3. Chromatid type aberrations in human lymphocytes. Two photos on the left show chromatid breaks. The photo on the right shows chromatid exchange (symmetrical complete chromatid exchange) [1, 5].

1.2. Barwienie wybranych par chromosomów za pomocą FISH – analiza częstości translokacji

Fluorescencyjna hybrydyzacja in situ, FISH (*fluorescent in situ hybridization*) polega na „malowaniu” części chromosomów, zazwyczaj 2 lub 3 par, poprzez hybrydyzację ich DNA z sondami DNA znakowanymi fluorescencyjnie [1, 10, 11] (rys. 4). Metoda pozwala na analizę translokacji, czyli aberracji stabilnych niewidocznych przy barwieniu FPG. Translokacje (rys. 4) nie powodują problemów strukturalnych w trakcie podziału komórkowego i dzięki temu są łatwo przekazywane komórkom potomnym, a okres ich „trwania” w komórkach jest znacznie dłuższy niż np. chromosomów dicentrycznych.

Analiza translokacji jest droższa niż analiza preparatów barwionych FPG, ponieważ dochodzą tutaj koszty zakupu sond DNA, użycia mikroskopu fluorescencyjnego i oprogramowania ułatwiającego analizę. W Pracowni Dozymetrii Biologicznej IChTJ (Warszawa) dysponujemy odpowiednim sprzętem do analizy translokacji – dwoma zmotoryzowanymi mikroskopami Zeiss wraz z systemem do analizy aberracji Metasystems.

Analiza translokacji, jako bardziej dokładna metoda, jest często używana do analizy częstości aberracji u zdrowych dawców z ogółu populacji oraz aberracji u osób pracujących z promieniowaniem, metalami ciężkimi czy narażonych na genotoksyczne oddziaływania środowiskowe (np.: [1, 8, 12, 13]). Metoda FISH jest również wykorzystywana do badania częstości aberracji u pracowników elektrowni jądrowych (np.: [12, 14, 15]).



Rys. 4. Ludzki limfocyt krwi obwodowej w czasie mitozy, poddany napromienieniu w dawce 2 Gy promieniowania X, wybarwiony DAPI (4',6-diamidyno-2-fenylindol), z pomalowaną jedną parą chromosomów homologicznych (FISH). Widoczna translokacja wzajemna (*reciprocal translocation*) pomiędzy pomalowanym chromosomem 2 a chromosomem zabarwionym tylko DAPI (czerwone strzałki).

Fig. 4. *Peripheral blood human lymphocyte in mitosis, irradiated with 2 Gy of X-rays, DAPI stained, with one pair of chromosomes painted green, using FISH technique. Reciprocal translocation between FISH painted chromosome 2 and DAPI stained chromosome (red arrows) is visible.*

1.3. Technika m-FISH – barwienie wszystkich chromosomów

Doskonalszą i jednocześnie najdroższą wersją metody FISH jest metoda m-FISH. Wielokolorowa fluorescencyjna hybrydyzacja in situ-m-FISH (*multicolor in situ hybridization*) pozwala na analizę translokacji we wszystkich chromosomach [11, 16–19] (rys. 5). Każda para chromosomów homologicznych jest hybrydyzowana z innym zestawem sond DNA i dzięki temu możliwe jest rozpoznanie materiału pochodzącego z każdego chromosomu.

Do analizy m-FISH potrzebny jest mikroskop fluorescencyjny z zestawem filtrów oraz specjalny program komputerowy. Aktualnie istnieją dwie firmy, które sprzedają zestawy sond do m-FISH i oprogramowanie do analizy aberracji: Metasystems (Niemcy) i ASI (*Applied Spectral Imaging*, Izrael, HiSKY, SKY) [20]. Oba systemy są używane, ale zdecydowanie popularniejszy jest Metasystems, stosowany również w Pracowni Dozymetrii Biologicznej w Warszawie.



Rys. 5. Ludzki limfocyt krwi obwodowej w czasie mitozy, poddany napromienieniu w dawce 2 Gy jonów węgla (C), wybarwiony techniką m-FISH, pomalowane wszystkie chromosomy. Widoczne liczne aberracje, w tym kilka kompleksowych. Aberracji jest tak dużo, że zaznaczono strzałkami tylko 3 charakterystyczne dla metody m-FISH, niemożliwe do dokładnego opisanego albo niewidoczne przy barwieniu metodą Giemsa. Zielona strzałka pokazuje chromosom tricentryczny, składający się z materiału pochodzącego od 4 różnych chromosomów, będący częścią większej aberracji kompleksowej. Żółta strzałka pokazuje chromosom dicentryczny zawierający insercję. Chromosom jest również częścią większej kompleksowej aberracji. Strzałka niebieska pokazuje translokację pomiędzy dwoma chromosomami.

Fig. 5. *Human peripheral blood lymphocyte in mitosis, irradiated with 2 Gy of C-ions (carbon ions), stained with m-FISH method. Numerous chromosomal aberrations visible, a few complex aberrations among them. There are so many aberrations that only three are pointed with the arrows. Chosen aberrations would be not entirely visible, if stained with Giemsa. The green arrow indicates trivalent chromosome, consist of genetic material of four different chromosomes, the chromosome is the part of bigger complex aberrations. The yellow arrow points dicentric chromosome with insertion, which is the part of more complicated complex aberration, too. The blue arrow points translocation between two chromosomes.*

2. Wartości bazowe częstości aberracji na preparatach barwionych barwnikiem Giemsy – przegląd publikacji

Bazy danych dotyczących częstości aberracji u osób zdrowych z ogółu populacji powstawały w laboratoriach zajmujących się genetycznymi skutkami promieniowania, genetycznymi zmianami związanymi z chorobami (głównie nowotworami) czy z czynnikami środowiskowymi. Powstały one w wyniku międzynarodowych projektów naukowych, a ostatnio publikowane są dane z poszczególnych krajów (tab. 1). Większość dostępnych danych pochodzi z analizy preparatów barwionych techniką FPG.

Baza częstości aberracji u zdrowych dawców powinna być odpowiednio liczna i uwzględniać szereg czynników, takich jak wiek dawców, płeć, palenie papierosów czy zróżnicowanie geograficzne i etniczne oraz inne czynniki. Przykładowe dane dotyczące poziomu aberracji u zdrowych dawców z ogółu populacji w różnych krajach pokazano w tabeli 1. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu w tabeli 1 uwzględniono tylko niektóre klasy aberracji i nie pokazano żadnych czynników mogących wpływać na częstość tych aberracji.

Wydaje się, że w Polsce baza danych aberracji u zdrowych dawców z ogółu populacji powstała tylko raz 25 lat temu na Śląsku. Jednak w powyższej publikacji analizowano wspólnie aberracje strukturalne i „gaps”, które nie są aberracjami, co nie pozwala porównać tych wyników z innymi pracami [21]. Opublikowano również dane o aberracjach analizowanych za pomocą techniki G-band u dawców kontrolnych [22]. Ponownie uzyskane wyniki, choć bardzo wartościowe, bo pozwalają zobaczyć statystycznie istotne zwiększenie częstości aberracji wraz z wiekiem dawców, nie mogą jednak być porównywane z danymi z tabeli 1 z tego względu, że technika G-band kładzie nacisk na inny typ aberracji: aberracje stabilne – translokacje, których standardowo nie analizuje się na preparatach barwionych metodą Giemsy. Biorąc pod uwagę rozwój energetyki jądrowej, a także wykorzystanie do analizy zmotoryzowanych mikroskopów sprzężonych z kamerami CCD o wysokiej rozdzielczości i programami przeznaczonymi do analizy aberracji, co daje lepsze możliwości analityczne, wydaje się konieczne, aby taka baza danych powstała w naszym kraju w chwili obecnej.

Analizując dane zawarte w tabeli 1, nasuwają się dwa wnioski: po pierwsze, częstość chromosomów dicentrycznych (ewentualnie razem z pierścieniami centrycznymi) jest bardzo zbliżona w badanych populacjach: od 0,00 do 2,99 na 1000 komórek. Po drugie, takiej zgodności nie ma, jeżeli chodzi o inne aberracje. Jeżeli popatrzymy na częstość wszystkich aberracji, to zawiera się ona w przedziale od 1,08 aż do 17,3 aberracji na 1000 komórek i ten zakres jest bardzo szeroki. Wartość 45,7 aberracji na 1000

komórek (Barcinski et al. 1975) wyraźnie różni się od pozostałych cytowanych w tabeli 1 wyników badań i prawdopodobnie może zostać odrzucona [23].

3. Ryzyka rozwoju choroby nowotworowej i częstości aberracji u pracowników energetyki jądrowej

Pracownicy energetyki jądrowej narażeni są na różne dawki promieniowania jonizującego (różnych jego rodzajów: promieniowania gamma, promieniowania X, promieniowania beta, ale również neutronów) [15]. Zasadniczo dawki pochłonięte przez pracowników są rejestrowane i można znaleźć dane dotyczące każdej osoby (np. w *Korean National Dose Registry* [15] czy *National Registry for Radiation Workers* w Wielkiej Brytanii [40]).¹ Efektywne dawki roczne nie przekraczają 20 mSv, ale te najwyższe zbliżają się do tej granicy [15]. Sumy dawek otrzymanych w ciągu dziesiątek lat liczone są czasami w setkach milisiwertów [15, 40, 41].

Wyniki badań dotyczących umieralności na nowotwory wśród pracowników przemysłu jądrowego nie są jednoznaczne. Opublikowane w 2007 roku przez Międzynarodową Komisję do Badań nad Nowotworami (IARC) prace dotyczące umieralności na nowotwory pośród 400 000 pracowników przemysłu jądrowego w 15 krajach pokazały zwiększenie tej umieralności w obszarze niskich dawek (np. [40]). Badania te pokazały wzrost ryzyka względnego (RR – *relative risk*) umieralności wraz z dawką zarówno dla wszystkich nowotworów łącznie, jak i białaczek (bez białaczki limfocytowej) oraz nowotworów płuc. W 2015 roku opublikowano raporty będące reanalizą i kontynuacją prac z 2007 roku (IARC), tzw. The International Nuclear Workers Study (INWORKS), a wyniki uzyskane w nich były analogiczne do badań z 2007 roku [41, 42]. Podobne wyniki badań otrzymało wielu autorów dla zapadalności na nowotwory, na przykład: Muirhead [43], analizując rejestry zapadalności na nowotwory osób zawodowo narażonych na promieniowanie w Wielkiej Brytanii, czy Metz-Flamant et al. [44] analizujący zapadalność na nowotwory lite u pracowników przemysłu jądrowego we Francji.

Inni autorzy uważają jednak, że niskie dawki promieniowania w przemyśle jądrowym nie powodują wzrostu ryzyka umieralności na nowotwory. Oto kilka wybranych przykładów:

- publikacja z Japonii [45] – podobny współczynnik umieralności na nowotwory u osób narażonych na niskie dawki w przemyśle jądrowym i u ogółu Japończyków;
- raport Canadian Nuclear Safety Commission (2011) [46] o ryzyku umieralności na nowotwory u pracowników przemysłu jądrowego w Kanadzie, pokazujący brak wzrostu ryzyka;

¹ W Polsce krajowy rejestr dawek pracowników kategorii A prowadzi Prezes Państwowej Agencji Atomistyki, jednak z oczywistej przyczyny póki co brak w nim danych dotyczących pracowników przemysłu jądrowego

Tabela 1. Przykładowe dane dotyczące poziomu aberracji na preparatach barwionych barwnikiem Giemsa, u zdrowych dawców z ogółu populacji w różnych krajach.**Table 1.** Exemplary control data set of aberrations, in Giemsa stained preparations.

Bibliografia	Kraj (region, miasto)	Liczebność grupy badanej	Liczba komórek	Dic (Dic + CR) / 1000 komórek	Ace / 1000 komórek	Pęknięcia chromatydowe / 1000 komórek	Inne aberracje / 1000 komórek	Suma wszystkich aberracji / 1000 komórek
Barcinski et al., 1975 [23]	Brazylia	147	9001	(0,67)	8,6	n.r.	36,4	45,7
Lloyd et al., 1980 [24]	Praca przeglądowa	2000	211 661	0,78	3,7	n.r.	n.r.	n.r.
Gundy et al., 1983 [25]	Węgry	175	17 500	(0,69)	4,6	6,4	n.r.	11,7
Bender et al., 1988 [26]	Praca przeglądowa	2830	303 233	1,41	3,2	n.r.	n.r.	n.r.
Ganguly et al., 1993 [27]	Indie	117	11 700	2,99	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Bauchinger et al., 1994 [28]	Niemcy	85	45 952	(0,52)	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Carbonell et al. 1996 [9]	Hiszpania	85	8 194	(0,19)	1,0	2,8	0,1	4,5
Stephan et al., 1999 [29]	Niemcy	53	54 689	(1,23)	2,6	7,0	0,4	11,2
Testa et al., 2001 [30]	Kazachstan	20	4000	(0,75)	5,5	n.r.	n.r.	6,3
Svyatova et al., 2002 [31]	Kazachstan	25	8697	(0,46)	2,0	6,5	3,8	12,8
Abil'dinova et al., 2003 [32]	Kazachstan	25	8716	(0,23)	2,0	5,6	3,7	11,5
Atanasova et al., 2005 [8]	Bułgaria	9	4200	(0,00)	0,3	0,7	0,0	1,1
Tanaka et al., 2006 [33]	Kazachstan	46	14 192	(0,78)	n.r.	1,4	n.r.	n.r.
Takeichi et al., 2006 [34]	Kazachstan	18	6600	(0,15)	1,1	n.r.	0,2	1,4
Nefic and Musanovic, 2014 [35]	Bośnia i Hercegowina	100	10 000	0,52	1,3	0,9	n.r.	2,8
Santovito et al., 2015 [36]	Włochy	101	20 200	0,50 (1,93)	5,5	10,3	n.r.	17,3
Karuppasamy et al., 2018 [37]	Indie	97	25 359	(1,54)	n.r.	n.r.	6,6	8,2
Djansugurova et al., 2020 [38]	Kazachstan	236	22 642	(0,13)	n.r.	n.r.	n.r.	11,7
Kezhina et al., 2022 [39]	Kazachstan	40	168 362	(0,79)	1,3	n.r.	n.r.	2,1

Dic – liczba chromosomów dicentrycznych

Ace – liczba pierścieni acentrycznych

CR – liczba pierścieni centrycznych

n.r. – dane nie rejestrowane

- publikacja z Niemiec [47] – współczynnik umieralności na nowotwory zmniejszony u pracowników elektrowni jądrowych w Niemczech w latach 1991–1997;
- seria artykułów przeglądowych z Polski [48, 49, 50] pokazująca, na podstawie analizy danych z różnych publikacji, że dawki promieniowania w energetyce jądrowej nie są szkodliwe.

Większy konsensus panuje co do tego, że u pracowników przemysłu jądrowego, narażonych na niskie, chroniczne dawki promieniowania jonizującego znajdziemy podwyższone częstości aberracji chromosomowych. Takie dane uzyskane za pomocą analizy preparatów barwionych metodą Giemsa i malowania chromosomów (FISH) uzyskano w wielu badaniach:

- Niemcy – istotnie podwyższona częstość chromosomów dicentrycznych u 22 pracowników elektrowni o średniej skumulowanej dawce 390 mSv (zakres dawek 270–530 mSv) [51];
- Finlandia – częstość translokacji wyższa u pracowników elektrowni jądrowej, którzy średnio dostali dawkę skumulowaną w wysokości 100 mSv. Analiza częstości chromosomów dicentrycznych nie pozwoliła dostrzec takiej zależności [12, 52];
- Bułgaria – badanie częstości aberracji techniką FPG oraz techniką FISH – w obu przypadkach znaleziono istotnie więcej aberracji u pracowników elektrowni jądrowych narażonych na niskie dawki promieniowania niż w kontrolach [14, 53];
- Wielka Brytania – statystycznie istotny związek pomiędzy zewnętrzną dawką promieniowania a częstością translokacji (pomalowane 3 pary chromosomów) u pracowników elektrowni jądrowej [54];
- Korea – częstość aberracji chromosomowych i chromatydowych u pracowników elektrowni jądrowych znacząco wyższa niż w grupie kontrolnej i wzrastająca wraz ze wzrostem dawki promieniowania [15].

Według naszej wiedzy to tej pory nie opublikowano wyników badań częstości aberracji u pracowników przemysłu jądrowego analizowanych za pomocą techniki m-FISH, która wydaje się najbardziej dokładna.

Podwyższona częstość aberracji jest widocznym wskaźnikiem narażenia organizmu na czynniki genotoksyczne, w przypadku pracowników elektrowni jądrowych na promieniowanie jonizujące. Z drugiej strony wielu autorów łączy podwyższoną częstość aberracji z rozwojem/indukcją procesu nowotworzenia (np.: [55, 56]). Tak więc badanie poziomu aberracji, indukowanych niskimi dawkami promieniowania przez wiele lat pracy, może w pewnym zakresie pomóc określić ryzyko rozwoju choroby nowotworowej.

4. Podsumowanie i wnioski

- Częstość aberracji w komórkach pochodzących od zdrowych dawców z ogółu populacji jest badana w wielu krajach europejskich jako podstawowy element kontroli czynników potencjalnie genotoksycznych, takich jak promieniowanie jonizujące.
- Do kontroli częstości aberracji używane są generalnie trzy metody: najczęściej barwienie za pomocą barwnika Giemsa (FPG), rzadziej FISH lub m-FISH.
- W sytuacji rozwoju energetyki jądrowej potrzeba kontroli wpływu niskich dawek promieniowania, sumujących się przez wiele lat, na częstość zmian genotoksycznych.
- W Polsce brak jest bazy danych poziomu aberracji u zdrowych dawców z ogółu populacji, adekwatnej dla metod analitycznych z początku XXI wieku.
- Pracownia Dozymetrii i Ochrony Radiologicznej Instytutu Chemii i Techniki, posiadając nowoczesne systemy do analizy obrazu sprzężone z mikroskopami (Metasystems), odpowiednie procedury i kompetentny personel, jest odpowiednim miejscem do stworzenia bazy danych poziomu aberracji u zdrowych dawców z ogółu populacji.

Notki o autorach

Dr Sylwester Sommer – Kierownik Pracowni Dozymetrii Biologicznej, Centrum Radiobiologii i Dozymetrii Biologicznej w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej, adiunkt.

Dr Katarzyna Sikorska – Kierownik ds. Jakości w Pracowni Dozymetrii Biologicznej, Centrum Radiobiologii i Dozymetrii Biologicznej w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej, adiunkt.

Literatura

1. IAEA, „Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies”, EPR-Biodosimetry 2011, Vienna.
2. Baudin C., Bernier M., Klovov D., Andreassi M., *Biomarkers of Genotoxicity in Medical Workers Exposed to Low-Dose Ionizing Radiation: Systematic Review and Meta-Analyses*. Int J Mol Sci. 13; 22 (14), 2021,7504.
3. PN-EN-ISO-19238_2017. *Ochrona radiologiczna. Wymagania dotyczące jakości badań laboratoriów stosujących metody cytogenetyczne w dozymetrii biologicznej*.
4. Perry P., Wolff S., *New Giemsa method for the differential staining of sister chromatids*. Nature. 251, 1974, 156–158.
5. Savage J. R. K., *Classification and relationships of induced chromosomal structural changes*. J Med Genet. 12, 1975, 103–122.
6. Bignold L. P., *Mechanisms of clastogen-induced chromosomal aberrations: A critical review and description of a model based on failures of tethering of DNA strand ends to strand-breaking enzymes*. Mutat. Res. 681, 2009, 271–298.
7. Bender M. A., Awa A. A., Brooks A. L., Evans H. J., Groer P. G., Littlefield L. G., Pereira C., Preston R. J., Wachholz B. W., *Current status of cytogenetic procedures to detect and quantify previous exposures to radiation*. Mutat. Res. 196, 1988, 103–159.
8. Atanasova P., Hadjidekova V., Agova S., Iovtchev M., *Chromosomal Aberrations in Radiation Waste Repository Workers Detected by FISH Painting and Giemsa Staining*. Turk J Med Sci. 34, 2004, 359–365.
9. Carbonel E., Peris F., Xamena N., Creus A., Marcos R., *Chromosomal aberration analysis in 85 control individuals*. Mutat. Res. 370, 1996, 29–37.
10. Huber D., Voith von Voithenberg L., Kaigala G.V., *Fluorescence in situ hybridization (FISH): History, limitations and what to expect from micro-scale FISH?* Micro Nano Eng. 1, 2018, 15–24.
11. Shakoori A.R., *Fluorescence In Situ Hybridization 16 (FISH) and Its Applications*, 10, 2017, 343–367.
12. Lindholm C., *Stable chromosome aberrations in the reconstruction of radiation doses*. STUK-A176. Helsinki 2000.
13. Touil N., Aka P. V., Buchet J. P., Thierens H., Kirsch-Volders M., *Assessment of genotoxic effects related to chronic low level exposure to ionizing radiation using biomarkers for DNA damage and repair*. Mutagenesis. 17, (3), 2002, 223–32.
14. Hristova R., Hadjidekova V., Grigorova M., Nikolova T., Bulanova M., Popova L., Staynova A., Benova D. *Chromosome analysis of nuclear power plant workers using fluorescence in situ hybridization and Giemsa assay*. J. Radiat. Res. 54, 2013, 832–839.
15. Kim Y.J., Lee J.W., Cho Y.H., Choi Y.J., Lee Y., Chung H.W., *Chromosome Damage in Relation to Recent Radiation Exposure and Radiation Quality in Nuclear Power Plant Workers*. Toxics. 18, 10 (2), 2022, 94.
16. Balajee A.S., *Applications of Fluorescence in Situ Hybridization in Radiation Cytogenetic Biodosimetry and Population Monitoring*. OBM Genetics. 2018.
17. Crespo R.H., Domene M.M., Prieto Rodríguez M.J., *Biodosimetry and assessment of radiation dose*. Rep. Pract. Oncol. Radiother. 16, 2011, 131–137.
18. Geigl J.B., Uhrig S., Speicher M.R., *Multiplex-fluorescence in situ hybridization for chromosome karyotyping*. Nat. Protoc. 1, 2006, 1172–1184.
19. Onozato M.L., Yapp C., Richardson D., Sundaresan T., Chahal V., Lee J., Sullivan J.P., Madden M.W., Shim H.S., Liebers M., Ho Q., Maheswaran S., Haber D.A., Zheng Z., Clancy B., Elliott H.L., Lennerz J.K., Iafrate A.J., *TECHNICAL ADVANCE Highly Multiplexed Fluorescence in Situ Hybridization for in Situ Genomics*. J. Mol. Diagn. 21, 2019, 1-18.
20. Trakhtenbrot L., *Spectral Karyotyping*. In: Schwab M. (eds) *Encyclopedia of Cancer*. Springer, 2011, 3472–3476, doi:10.1007/978-3-642-16483-5_5433.
21. Motykiewicz G., Michalska J., Pendzich J., Małusecka E., Stróżyk M., Kalinowska E., Butkiewicz D., Mielżyńska D., Midro A., Santella R., Chorąży M., *A molecular epidemiology study in women from Upper Silesia, Poland*. Toxicol. Lett. 96, 97, 1998, 195–202.
22. Wojda A., Ziętkiewicz E., Mossakowska M., Pawłowski W., Skrzypczak K., Witt M., *Correlation Between the Level of Cytogenetic Aberrations in Cultured Human Lymphocytes and the Age and Gender of Donors*. J. Gerontol. 61A, 8, 2006, 763–772.
23. Barcinski M.A., Abreu M.D.C., De Almeida J.C.C., Naya J.M., Fonseca, L.G., Castro L.E., *Cytogenetic Investigation in a Brazilian Population Living in an Area of High Natural Radioactivity*. Am. J. Hum. Genet. 27, 1975, 802.

24. Lloyd D.C., Purrott R.J., Reeder E.J., *The Incidence of Unstable Chromosome Aberrations in Peripheral Blood Lymphocytes from Unirradiated and Occupationally Exposed People*. Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen. 72, 1980, 523–532.
25. Gundy S., Varga L.P., *Chromosomal Aberrations in Healthy Persons*. Mutat. Res. Lett. 120, 1983, 187–191.
26. Bender M.A., Awa A.A., Brooks A.L., Evans H.J., Groer P.G., Littlefield L.G., Pereira C., Preston R.J., Wachholz B.W., *Current Status of Cytogenetic Procedures to Detect and Quantify Previous Exposures to Radiation*. Mutat. Res. Genet. Toxicol. 196, 1988, 103–159.
27. Ganguly B.B., *Cell Division, Chromosomal Damage and Micronucleus Formation in Peripheral Lymphocytes of Healthy Donors: Related to Donor's Age*. Mutat. Res. 295, 1993, 135–148.
28. Bauchinger M., Schmid E., Braselmann H., Kulka U., *Chromosome Aberrations in Peripheral Lymphocytes from Occupants of Houses with Elevated Indoor Radon Concentrations*. Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen. 310, 1994, 135–142.
29. Stephan G., Pressl S., *Chromosomal Aberrations in Peripheral Lymphocytes from Healthy Subjects as Detected in First Cell Division*. Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen. 446, 1999, 231–237.
30. Testa A., Stronati L., Ranaldi R., Spano M., Steinhäusler F., Gastberger M., Hubmer A., Ptitskaya L., Akhmetov M., *Cytogenetic Biomonitoring Carried out in a Village (Dolon) Adjacent to the Semipalatinsk Nuclear Weapon Test Site*. Radiat. Environ. Biophys. 40, 2001, 125–129.
31. Svyatova G.S., Abil'dinova G.Z., Berezina G.M., *Results of a Cytogenetic Study of Populations with Different Radiation Risks in the Semipalatinsk Region*. Russ. J. Genet. 38, 2002, 294–299.
32. Abil'dinova G.Z., Kuleshov N.P., Svyatova G.S., *Chromosomal Instability Parameters in the Population Affected by Nuclear Explosions at the Semipalatinsk Nuclear Test Site*. Russ. J. Genet. 39, 2003, 944–947.
33. Tanaka K., Iida S., Takeichi N., Chaizhunosova N.J., Gusev B.I., Inaba T., Hoshi M., *Unstable-Type Chromosome Aberrations in Lymphocytes from Individuals Living near Semipalatinsk Nuclear Test Site*. J. Radiat. Res. 47, 2006, 159–164.
34. Takeichi N., Hoshi M., Iida S., Tanaka K., Harada Y., Zhumadilov Z., Chaizhunosova N., Apsalikov K.N., Noso Y., Inaba T., *Nuclear Abnormalities in Aspirated Thyroid Cells and Chromosome Aberrations in Lymphocytes of Residents near the Semipalatinsk Nuclear Test Site*. J. Radiat. Res. 47, 2006, 171–177.
35. Nefic H., Musanovic J., *The effects of biological and life-style factors on baseline frequencies of chromosome aberrations in human lymphocytes*. Arch. Pharm. Pract. 5, 1, 2014.
36. Santovito A., Cervella P., Delpero M., *Baseline Frequency of Chromosomal Aberrations and Sister Chromatid Exchanges in Peripheral Blood Lymphocytes of Healthy Individuals Living in Turin (North-Western Italy): Assessment of the Effects of Age, Sex and GSTs Gene Polymorphisms on the Levels of Genomic Damage*. Ann. Hum. Biol. 43, 2016, 269–278.
37. Karuppasamy C.V., Ramachandran E.N., Kumar A., PR V.K., Koya P.K.M., Jaikrishan G., Das B., *Frequency of Chromosome Aberrations among Adult Male Individuals from High and Normal Level Natural Radiation Areas of Kerala in the Southwest Coast of India*. Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen. 828, 2018, 23–29.
38. Djansugurova L., Altyanova N., Cherednichenko O., Khussainova E., Dubrova Y.E., *The Effects of DNA Repair Polymorphisms on Chromosome Aberrations in the Population of Kazakhstan*. Int. J. Radiat. Biol. 96, 2020, 614–621.
39. Kenzhina L. B., Mamyrbayeva A. N., Lukashenko S. N., Baigazinov Z. A., Biyakhmetova D. B., Panitskiy A. V., Polivkina E., Zhamaldinov F. F., Patrono C., Palma V. and Testa A., *Background Level of Unstable Chromosome Aberrations in the Kazakhstan Population: A Human Biomonitoring Study*. Int. J. Environ. Res. Public Health 19, 2022, 8485.
40. Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., Gilbert E., Hakama M., Hill C., Howe G., Kaldor J., Muirhead C. R., Veress K., *The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Estimates of Radiation-Related Cancer Risks*, Radiation Research 167, 2007, 96–416.
41. Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D., Gillies M., O'Hagan J.A., Hamra G.B., Haylock R., Laurier D., Leuraud K., Moissonnier M., Schubauer-Berigan M.K., Thierry-Chef I., Kesminiene A., *Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)* BMJ. 2015, 351.
42. Hamra G.B., Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D., Gillies M., O'Hagan J.A., Haylock R., Laurier D., Leuraud K., Moissonnier M., Schubauer-Berigan M., Thierry-Chef I. and Kesminiene A., *Cohort Profile: The International Nuclear Workers Study (INWORKS)*. Int. J. Epidemiol. 2015, 1–7.
43. Muirhead C.R., O'Hagan J.A., Haylock R.G., *Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers*. Br J Cancer. 100, 2009, 206–12.
44. Metz-Flamant C., Samson E., Caer-Lorho S., Acker A., Laurier D., *Solid cancer mortality associated with chronic external radiation exposure at the French atomic energy commission and nuclear fuel company*. Radiat Res. 176, 2011, 115–27.
45. Iwasaki T., Murata M., Ohshima S., Miyake T., Kudo S., Inoue Y., Narita M., Yoshimura T., Akiba S., Tango T., Yoshimoto Y., Shimizu Y., Sobue T., Kusumi S., Yamagishi C., Matsudaira H., *Second Analysis of Mortality of Nuclear Industry Workers in Japan 1986–1997*. Radiat. Res. 159, 2003, 228–238.
46. Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) *Verifying Canadian Nuclear Energy Worker Radiation Risk: A Reanalysis of Cancer Mortality in Canadian Nuclear Energy Workers (1957–1994) SUMMARY REPORT 2011*.
47. Merzenich H., Hammer G.P., Tröltzsch K., Ruecker K., Buncke J., Fehrer F., Blettner M., *Mortality risk in a historical cohort of nuclear power plant workers in Germany: results from a second follow-up*. Radiat Environ Biophys. 53, 2014, 405–16.
48. Fornalski K.W., Dobrzyński L., *The Cancer mortality in high natural radiation areas in Poland*. Dose-Response. 2012, 541–561.
49. Fornalski K.W., Dobrzyński L., *Efekt zdrowego pracownika w przemyśle jądrowym*. Biuletyn Państwowej Agencji Atomistyki „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna”. 3, 2009, 46–52.
50. Reszczyńska J., Dobrzyński L., *Problemy zasad ochrony radiologicznej w obszarze małych dawek promieniowania*. Biuletyn Państwowej Agencji Atomistyki „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna”. 1, 2017, 32–40.
51. Braselmann H., Schmid E., Bauchinger M., *Chromosome aberrations in nuclear power plant workers: the influence of dose accumulation and lymphocyte life-time*. Mutation Res. 306, 2, 1994, 197–202.
52. Lindholm C., *Stable and unstable chromosomal aberrations among Finnish nuclear power plant workers*. Radiat Prot Dosimetry. 93, 2001, 143–50.
53. Hristova R., Georgieva D., Staynova A., Hadjidekova V., *Assessment of Cytogenetic Abnormalities by FISH in Lymphocytes from a Victim Accidentally Exposed to Cobalt-60*. OBM Genetics. 4, 2018, 1–10.
54. Tawn E.J., Curwen G.B., Jonas P., Gillies M., Hodgson L., Cadwell K.K., *Chromosome Aberrations Determined by FISH in Radiation Workers from the Sellafield Nuclear Facility*. Radiat. Res. 184, 3, 2015, 296–303.
55. Bonassi S., Znaor A., Norppa H., Hagmar L., *Chromosomal aberrations and risk of cancer in humans: an epidemiologic perspective*. Cytogenet Genome Res. 104, 2004; 376–82.
56. Boffetta P., van der Hel O., Norppa H., Fabianova E., Fucic A., Gundy S., Lazutka J., Cebulska-Wasilewska A., Puskailerova D., Znaor A., Kelecsenyi Z., Kurtinaitis J., Rachtan J., Forni A., Vermeulen R., Bonassi S., *Chromosomal Aberrations and Cancer Risk: Results of a Cohort Study from Central Europe*. Am. J. Epidemiol. 165, 2007, 36–43.

Wykorzystanie w technice radiacyjnej rozproszonego promieniowania wokół skanera przemysłowego akceleratora elektronów

The use of scattered radiation in radiation technique around the scanner of the industrial electron accelerator

Wojciech Głuszewski
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Streszczenie: Opisano rozkład dawki rozproszonego promieniowania wokół skanera przemysłowego akceleratora elektronów Elektronika 10/10 o energii 10 MeV i mocy 10 kW. W badaniach do celów dozymetrycznych wykorzystano folię z PCW i alaninę. Wykazano, że w praktyce do obróbki radiacyjnej można wykorzystać rozproszone elektrony i promieniowanie hamowania o mocach dawki od 1 do 50 kGy/h lub promieniowanie hamowania o mocach dawki od 0,05 do 4 kGy/h. W celu realizacji konkretnego napromieniowania należy wykonać indywidualną dozymetrię dla wybranego miejsca wokół transportera, uwzględniając geometrię próbki. Do oceny dawki po każdym dniu napromieniowania można wykorzystać dozymetr alaninowy. Promieniowanie rozproszone wykorzystano na przykład do modyfikacji barwy bursztynu dawką 100 kGy.

Słowa kluczowe: Wiązka elektronów, akcelerator, promieniowanie hamowania, promieniowanie rozproszone.

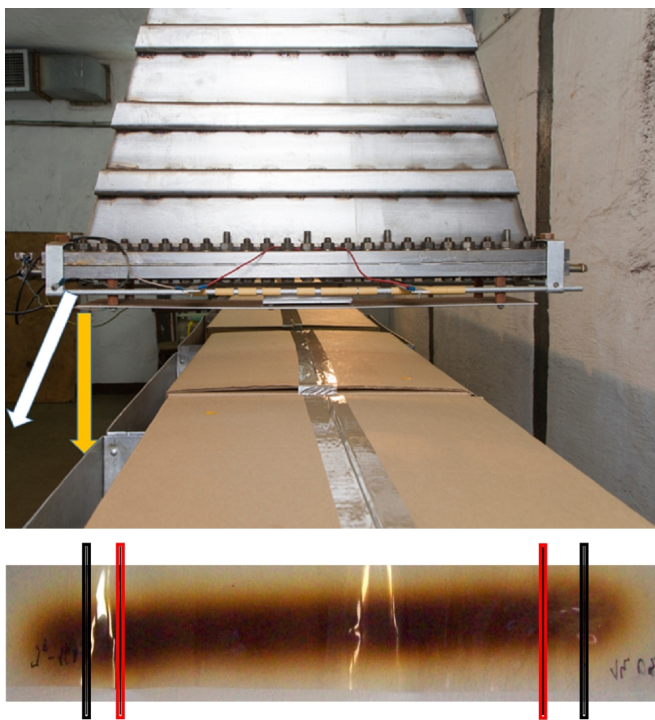
Abstract: The scattered radiation dose distribution around the scanner of the Elektronika 10/10 industrial electron accelerator with an energy of 10 MeV and a power of 10 kW is described. PVC foil and alanine were used for dosimetric purposes in the tests. It has been shown that in practice, scattered electrons and braking radiation with dose rates from 1 to 50 kGy/h or braking radiation with dose rates from 0.05 to 4 kGy/h can be used for radiation treatment. In order to perform a specific irradiation, individual dosimetry must be performed for a selected place around the transporter, taking into account the sample geometry. An alanine dosimeter can be used to assess the dose after each day of irradiation. Scattered radiation was used, for example, to modify the color of amber with a dose of 100 kGy.

Keywords: Electron beam, accelerator, braking radiation, scattered radiation.

Wstęp

W procesach radiacyjnej sterylizacji wyrobów medycznych pewna część wiązki elektronów (EB – *electron beam*) nie jest wykorzystywana [1, 2]. Celowo przemiatą się przyspieszane elektrony poza szerokość transportera, na którym poruszają się wyjaławiane wyroby (fot. 1). W ten sposób pozostaje margines, który gwarantuje dostarczenie do całego produktu założonej dawki promieniowania. Część energii elektronów ulega również konwersji w elektromagnetyczne promieniowanie hamowania (X). Oba rodzaje wychodzące poza transporter promieniowania można wykorzystać do obróbki radiacyjnej materiałów

bardzo dużymi dawkami (rzędu mega i giga Gy). Z punktu widzenia radiolizy rodzaj promieniowania nie ma znaczenia. W obu przypadkach (EB, X) praktycznie cała energia przekazywana jest do materiału przez elektrony wtórne. Istnieją natomiast różnice technologiczne wynikające z dużej mocy dawki wiązki elektronów i większego zasięgu promieniowania elektromagnetycznego. Każde zadanie wymaga więc, w zależności od rodzaju materiału i jego rozmiarów, indywidualnego rozwiązania problemu dozymetrii i sposobu napromieniowania (jednostronne, dwustronne, z rotacją) [3, 4, 5]. Można również, stosując osłony, odciąć elektrony wtórne, pozostawiając jedynie przenikliwe promieniowanie hamowania.



Fot. 1. Skaner akceleratora przemiatający wiązkę elektronów w poprzek taśmowego transportera, na którym poruszają się aluminiowe skrzynki z wyrobami do radiacyjnej sterylizacji. Pionowa (żółta) strzałka wskazuje zakres użyteczny wiązki. Strzałka ukośna (biała) oznacza promieniowanie skierowane poza transporter. Poniżej ślad wiązki przemiataanej utrwalony na folii z PCW. Czarne paski oznaczają szerokość transportera. Czerwone paski odpowiadają szerokości skrzynki.

Photo 1. Accelerator scanner sweeping the electron beam across the conveyor belt carrying aluminum boxes with products for radiation sterilization. The vertical (yellow) arrow indicates the useful range of the beam. The oblique arrow (white) indicates radiation directed away from the transporter. Below is a trace of the swept beam recorded on PVC foil. The black bars indicate the width of the carrier. The red bars correspond to the width of the box.

Przemysłowy akcelerator elektronów

Współczesne przemysłowe akceleratory przyspieszają elektrony w zakresie energii 0,05–15 MeV [6]. Większych energii do obróbki radiacyjnej nie stosuje się, chociaż byłoby to wygodne z punktu widzenia zasięgu promieniowania. Ograniczenie energii zapobiega zjawiskom promieniotwórczości wzbudzonej powstającej w wyniku reakcji fotojądrowych pierwiastków z wysokoenergetycznym promieniowaniem hamowania. Warto zauważyć, że takich formalnych wymogów nie ma w przypadku zastosowań wiązek elektronów do celów medycznych i naukowych. Jednak moce dawek promieniowania są wówczas o kilka rzędów mniejsze i dawki liczone w Gy, a nie kGy. W radioterapii, wykorzystującej wysokoenergetyczne elektrony, badania promieniowania hamowania są prowadzone głównie z punktu widzenia jego wpływu na organizm pacjenta.

Katoda emitująca elektrony, a także sekcja przyspieszająca oraz układy transportu i przemiataania wiązki zakończone folią wyjściową, umieszczone są w próżni. Konstrukcje akceleratorów zależą od przyjętej zasady działania, a także indywidualnych rozwiązań technicznych. W celu

ograniczenia efektów wynikających z termicznego obciążenia folii wyjściowej stosuje się przemiatanie typu x-y. Postęp, jaki dokonuje się w zakresie materiałów kompozytowych przeznaczonych na okna wyjściowe, powinien umożliwić w niedalekiej przyszłości wykonanie bardziej zwartych urządzeń o odpowiednio zwiększonej liniowej gęstości prądu wiązki. Niekiedy obok elektromagnesów przemiatających wiązkę stosowane są magnetyczne układy korekcji toru przyspieszonych elektronów, umożliwiające wyprowadzenie wiązki prostopadle do powierzchni folii na całej szerokości przemiataania. Istnieje wiele odmiennych konstrukcji urządzeń wyjściowych w zależności od przyjętego systemu transportu obrabianych materiałów, przy czym najbardziej rozpowszechniony jest układ z liniowym przemiataaniem wiązki współpracujący z transporterem. Niezależnie od konstrukcji akceleratora wiązka musi sięgać poza szerokość transportera. W przypadku wyrobów medycznych unika się ryzyka, że pewna część produktu nie zostanie wyjałowiona. Tę stosunkowo niewielką część wiązki można w praktyce wykorzystać do obróbki radiacyjnej materiałów dużymi dawkami. Czas napromieniania liczony jest wówczas w godzinach, a nie w sekundach, jak to ma miejsce przy materiałach wyjaławianych na transporterze dawką rzędu 25 kGy. W dużym obszarze wokół transportera działają elektrony rozproszone i promieniowanie hamowania. Należy pamiętać, że obróbka radiacyjna, mimo stałego postępu w zakresie konstrukcji instalacji akceleratorowych, jest nadal stosunkowo kosztownym zabiegiem, w szczególności gdy dawki są rzędu MGy. Niewykorzystane technologicznie do radiacyjnej sterylizacji rozproszone promieniowanie ma więc ekonomiczną wartość. W ten sposób można na przykład badać radiacyjną odporność materiałów stosowanych w budowie składowisk odpadów promieniotwórczych. Innym zastosowaniem jest barwienie kamieni szlachetnych i półszlachetnych. Mieszane promieniowania X i elektrony są również wygodnym rozwiązaniem dla testów odporności na działanie promieniowania jonizującego np. paliwa do silników raketowych statków/sond kosmicznych wysyłanych w długotrwałe misje na bardzo dalekie odległości. Zasadniczo nie chodzi w tych zastosowaniach o precyzyjne dostarczenie określonej dawki, lecz o osiągnięcie założonego efektu, który w przypadku tradycyjnych rozwiązań uzyskuje się wielodniowym napromienianiem. Dla porównania 500 kGy przy mocy dawki źródła gamma 1,5 kGy/h wymaga 14 dni napromieniania. W praktyce dostarczoną dawkę można dokładnie policzyć poprzez zsumowania odczytów wskaźników dozymetrów po każdym dniu napromieniania.

Dozymetryczna folia z PCW

Folia z polichlorku winylu wykorzystywana jest jako wygodny i tani dozymetr. W wyniku działania jonizującego promieniowania odrywane są od polimerowych łańcuchów atomy wodoru i chloru. Jednym z trwałych gazowych

produktów radiolizy jest w efekcie chlorowódz (HCl) [7, 8]. Kumulujące się wiązania podwójne powodują zmianę barwy folii od białej poprzez żółtą do ciemnobrązowej. Barwa w dużym zakresie jest proporcjonalna do wielkości dawki pochłoniętej promieniowania. Rutynowe zastosowanie PCW do kontroli dozymetrycznej nie jest zalecane ze względu na korodujące działanie HCl. Można jednak ją używać do określenia rozkładu dawki i energii elektronów. W tym drugim przypadku folia jest umieszczana w klinie (najczęściej aluminiowym), co pozwala wyznaczyć maksymalny zasięg elektronów (będący funkcją szybkości elektronów). Barwa polimeru jest trwała i w odróżnieniu od klisz fotograficznych niewrażliwa na światło. Na bazie PCW produkowane są również dozymetry typu przeszedł/nie przeszedł. Naklejone na wyroby medyczne wskaźniki pozwalają odróżnić materiał napromieniowany od niewyjałowionego. Często w celu zwiększenia czułości indykatora wykorzystuje się reakcję HCl ze związkami organicznymi. Nalepiona na samoprzylepne podłoże folia PCW zawiera zdyspergowany barwnik, który zmienia barwę pod wpływem radiolitycznie wytwarzanego chlorowodoru (podobnie jak papierki lakmusowe reagujące zmianą barwy na zakwaszenie roztworu).

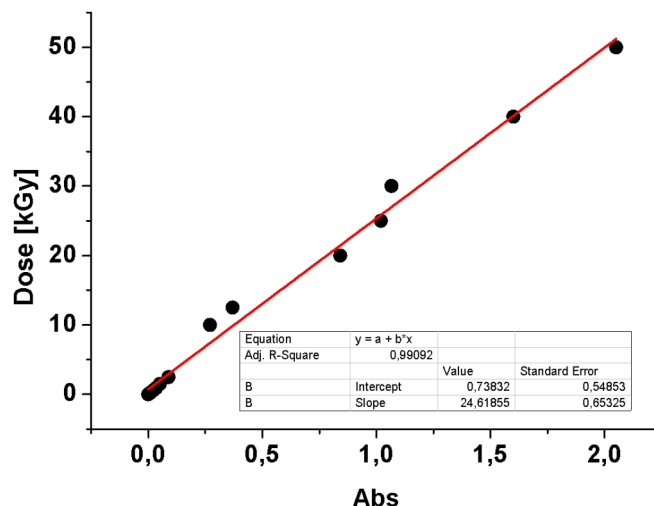
Tabela 1. Parametry folii PCW zastosowanej w badaniach.

Table 1. Parameters of the PVC foil used in the tests.

Producent	Kustoffwerke Staufen
Grubość	0,26 mm
Szerokość	16 mm
Gęstość	1,4 g/cm ³
Gęstość elektronowa	3,15 10 ²³ e/g
Efektywna liczba atomowa, Z	11,37
Masowa siła hamowania dla 1 MeV	1,64 MeVcm ² /g
Zakres liniowości	5–50 kGy
Długość fali pomiarowej	394 nm
Precyzja pomiaru	6–10%

W Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej opracowano i wykonano specjalne urządzenie do automatycznego spektrofotometrycznego pomiaru absorbancji folii dozymetrycznych. Czytnik dawki CD-02 pozwala mierzyć paski z tworzyw sztucznych o długości od 0,5 do 5 m. Specjalny układ mechaniczny przesuwają dozymetr przed okienkiem spektrofotometru i w ten sposób mierzone jest osłabienie strumienia światła (stopień zaciemnienia tworzywa) przy wybranej długości fali (394 nm). Program przelicza wartość absorbancji na dawkę pochłoniętego promieniowania, która jest wyświetlana w postaci wykresu na ekranie monitora. Średnia energia elektronów może być określona ze wzoru:

$$E_0 = 5,09 R_p + 0,200 \text{ (MeV)}$$



Rys. 1. Krzywa kalibracji dozymetru z folii PCW dla promieniowania gamma (moc dawki 2 kGy/h).

Fig. 1. Calibration curve of PVC foil dosimeter for gamma radiation (dose rate 2 kGy/h).

gdzie R_p jest praktycznym zasięgiem elektronów w centymetrach, otrzymanym przez ekstrapolację prostoliniowego odcinka dawki głębinowej w aluminium.

Dozymetr alaninowy

Dozymetria EPR/alaninowa bazuje na identyfikacji centrów paramagnetycznych generowanych radiacyjnie w postaci wolnych rodników. Ich stężenie w szerokim zakresie może być liniową funkcją dawki pochłoniętej. Selektowną i bardzo czułą metodą badania centrów paramagnetycznych jest elektronowy rezonans paramagnetyczny, EPR (*electron paramagnetic resonance*).

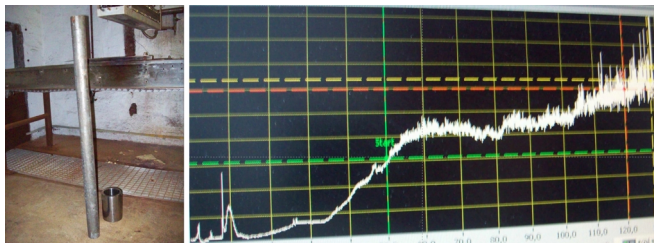
Za wielkość dozymetryczną przyjmuje się amplitudę linii centralnej sygnału EPR napromieniowanej alaniny. Do obliczenia dawki należy wyznaczyć krzywą kalibracji, korzystając z dozymetru o charakterze absolutnym lub referencyjnym. Wartość sygnału jest niezależna od mocy dawki i typu promieniowania o zbliżonym LET (*linear energy transfer* – liniowe przekazywanie energii). Pomiar dawki za pomocą alaniny można wykonać z pomocą Laboratorium Pomiarów Dawek Technologicznych (LPDT) w IChTJ. Jest to unikatowe w skali kraju laboratorium dozymetryczne, które od 2004 roku posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji w zakresie pomiarów technologicznych dawek promieniowania jonizującego, napromieniowywania małowymiarowych próbek ściśle określonymi dawkami promieniowania oraz badania dawkomierzy w polu promieniowania gamma i wiązki wysokoenergetycznych elektronów.

Eksperyment i opis wyników

Wstępnie wykonano pomiary rozkładu dawki wokół transportera za pomocą folii z PCW o szerokości 65 cm i długości 200 cm. Następnie do badań użyto pasków z tej samej

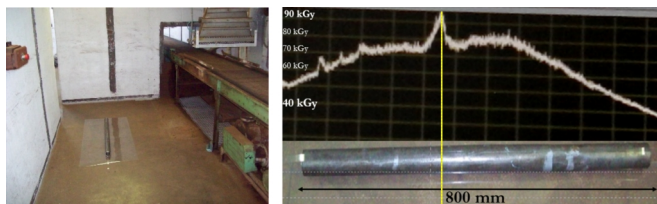
folii o szerokości taśmy filmowej (35 mm). Paski te wycięto bardzo precyzyjnie z dużej rolki, korzystając z technologii filmowych tak, aby nadawały się do automatycznych pomiarów spektrofotometrycznych. Paski układano również w osłonie ze stalowej rury o długości 1000 mm i średnicy 55 mm. Grubość rury dobrano na 3 mm, co jest odpowiednikiem 25 mm wody. Takie warstwy pozwalają uzyskać przy energii elektronów 10 MeV jednakowe dawki na powierzchni i spodzie napromieniowanego materiału.

Oznaczano dawki i zasięg mieszanego promieniowania X i elektronów. Dozymetry umieszczono prostopadle do kierunku transportera (fot. 2) oraz równoległe w odległości 500 mm od skanera. Wykonano również pomiar rozkładu dawki w stalowej rurze ustawionej pionowo w odległości 500 mm od skanera. Dozymetry napromieniowywano w czasie jednej zmiany produkcyjnej stacji sterylizacji radiacyjnej wyrobów medycznych (około 7 h). W celu oszacowania dawki jedynie od promieniowania X wykorzystano osłonę stalową osłabiającą dwukrotnie



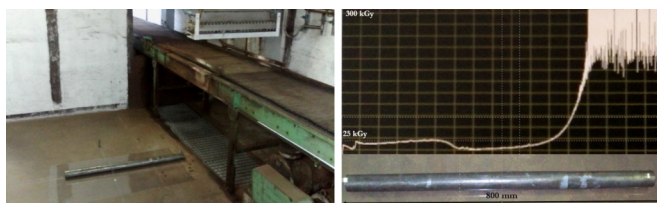
Fot. 2. Rura z paskiem z PCW ustawiana pionowo. Obok pojemnik z grubej stali osłabiający promieniowanie gamma ze źródła kobaltowego o 50%.

Photo 2. Pipe with a PVC strip placed vertically. Next to it is a thick steel container that weakens gamma radiation from a cobalt source by 50%.



Fot. 3. Rozkład dawki promieniowania hamowania i rozproszonych elektronów zmierzona równoległe do transportera w odległości 1000 mm od skanera elektronów (Fot. 1).

Photo 3. Dose distribution of braking radiation and scattered electrons measured parallel to the transporter at a distance of 1000 mm from the electron scanner (Photo 1).



Fot. 4. Pomiar rozkładu dawki w kierunku prostopadłym do skanera.
Photo 4. Measurement of dose distribution in the direction perpendicular to the scanner.

promieniowanie gamma przy średniej energii 1,25 MeV. Kilka centymetrów stali odcinało w tych warunkach całkowicie rozproszone elektrony.

W celu oceny energii rozproszonych elektronów porównano odczyty dozymetrów umieszczonych na rurze stalowej i w jej wnętrzu w odległościach 500 i 1000 mm od transportera.

Rura stalowa o grubości 33 mm osłabia dawkę w przyjętych warunkach od 3 do 4 razy. Można szacować, że średnia energia rozproszonych elektronów jest około 5 MeV. Praktycznie oznacza to, że dwustronnie możemy napromieniować materiały o gęstości powierzchniowej nie większej niż 2,5 g/cm².

Tabela 2. Moc dawki promieniowania wewnątrz rury stalowej o grubości ścianki 3mm w odległościach 0,5 m i 1 m.

Table 2. Radiation dose rate inside a steel pipe with a wall thickness of 3 mm at distances of 0.5 m and 1 m.

	500 mm	1000 mm
PCW w stali 3 mm	20 kGy	5 kGy
PCW	86 kGy	15,1 kGy
Oslabienie dawki	4 razy	3 razy
Moc dawki	4,3 kGy/h	3,0 kGy/h

Wartość dawki zmierzona w stalowym walcu ułożonym w odległości 30 mm od transportera wynosiła średnio 9 kGy. Stal osłabiała promieniowanie hamowania 2 razy. Tak więc, dawkę promieniowania hamowania bez osłony oszacowano na 18 kGy, co daje moc dawki w granicach 3,6 kGy/h.

Wnioski

Promieniowanie wokół skanera elektronów można wykorzystać do napromieniowywania materiałów różnymi dawkami. W odległości do 500 mm od transportera oddziałują elektrony bezpośrednio z akceleratora o energii około 10 MeV. Moc dawki szacowana jest na około 45 kGy/h. W tej samej odległości po odcięciu elektronów uzyskujemy promieniowanie hamowania o mocy dawki 3,5 kGy/h. W odległościach większych niż 500 mm można wykorzystać promieniowanie hamowania i elektrony rozproszone o bardzo różnej mocy dawki i znacznie mniejszej energii (około 5 MeV). Po pochłonięciu elektronów rozproszonych pozostaje promieniowanie hamowania o mocy dawki do kilku kGy na godzinę. W praktyce każde zadanie związane z napromieniowaniem należy poprzedzić badaniami dozymetrycznymi oceniającymi wielkości dawki i jej rozkładu. Do tego celu można wykorzystać folię z PCW i dozymetry alaninowe. W tych zastosowaniach nie można zaplanować precyzyjnie dawki pochłoniętej, ale można ją



Fot. 5. Na górze bursztyn po napromieniowaniu dawką 115 kGy. Pod spodem bursztyn w naturalnej barwie. Od lewej po 3 próbki napromieniowane odpowiednio w azocie, powietrzu i wodzie.

Photo 5. At the top, amber after irradiation with a dose of 115 kGy. Natural-colored amber underneath. From the left, 3 samples irradiated in nitrogen, air and water, respectively.

dokładnie zmierzyć za pomocą dozymetru alaninowego z wykorzystaniem EPR.

Na przykład obróbce radiacyjnej zakładaną dawką 100 kGy poddano próbki bałtyckiego bursztynu. Napromieniowanie prowadzono w azocie, powietrzu i wodzie. W praktyce uzyskano dawkę 115 kGy. Pod wpływem promieniowania jonizującego barwa zmieniła się z żółtej na brązowo-pomarańczową. Zjawisko to można wykorzystać w praktyce jubilerskiej. Ogranicza ono jednocześnie wykorzystanie techniki radiacyjnej w konserwacji obiektów o znacznemu historycznym zawierających bursztyn [9].

Notka o autorze

Dr inż. Wojciech Głuszewski – adiunkt w Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Chemik radiacyjny. Specjalista w zakresie przemysłowych zastosowań promieniowań jonizujących ze szczególnym uwzględnieniem radiacyjnej modyfikacji polimerów.

Literatura

- Głuszewski W., Zagórski Z.P., *Sterylizacja radiacyjna wyrobów medycznych*, Współczesna Onkologia 2003; 10(7), 787–790.
- Zimek Z., Panta P. P., Głuszewski W., *Radiation Processing for Pharmaceuticals*, Acta Poloniae Pharmaceutica 1999, vol. 56 Supplement, pp. 5–6.
- Zimek Z., Waliś L., Chmielewski A. G., *EB industrial facility for radiation sterilization of medical devices*, Radiation Physics and Chemistry 1993, 42, 1-3, 571–572.
- Panta P. P., Bułka S., Głuszewski W., *Dose Distribution Measurements in Reaction Vessel of Pilot Plant at EPS Kawęczyn*, Raport IChiTJ seria A nr 1/97.
- Panta P., Bułka S., Głuszewski W., *Spatial Dose Distribution in Reaction Vessel Measurements using PVC and CTA Films*, Annual Report INCT 1996, pp. 106–108.
- Panta P. P., Zagórski Z. P., Głuszewski W., *Thermal Defects of Water, Graphite and Polystyrene Affecting Calorimetric Response*, IAEA-TECDOC-1023 1998, pp. 499-509.
- Głuszewski W., *Kontrola dozymetryczna przemysłowych instalacji promieniowania elektronowego*, Postępy Techniki Jądrowej 2005, 48, 3, 12–16.
- Panta P.P., Głuszewski W., *Specific heat of selected graphites used in calorimetry of electron beam and its influence on the accuracy of measurement of large dose*, Nukleonika 2005, 50, Suppl. 2, 55–57.
- Głuszewski W., *Disinfection of cultural heritage objects using electron beam accelerators*, Radiation Technology Series No. 6, Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, IAEA, 2017, Chapter 20, 173–177.

Fuzja jądrowa we Wszechświecie

Nuclear fusion in the Universum

Jacek Kaczmarczyk¹, Aneta Łukaszek-Chmielewska², Sławomir Jednoróg³

¹ Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

² Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie

³ Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

Streszczenie: Według współczesnej kosmologii Wszechświat powstał w wyniku Wielkiego Wybuchu. Wszystkie podstawowe oddziaływania fizyczne były skonsolidowane. Tuż po Wielkim Wybuchu nastąpiła gwałtowna ekspansja Wszechświata nazywana inflacją. Obniżyła się wówczas gwałtownie jego temperatura, a rozmiary Wszechświata powiększyły się o kilkadziesiąt rzędów wielkości. Nie ma jak dotychczas spójnej teorii naukowej dotyczącej powstania barionów. Po kilku minutach od powstania Wszechświata rozpoczęła się nukleosynteza Wielkiego Wybuchu. Z barionów powstał wówczas wodór i deuter, a także hel i niewielkie ilości litu. Pierwiastki cięższe od litu powstały znacznie później, w wyniku spallacji, gwiazdnej nukleosyntezy, w ewoluujących i wybuchających gwiazdach. Doskonałym przykładem fuzji jest Słońce. Czerpie ono energię z cyklu protonowego i cyklu Bethego-Weizsackera zwanego również CNO.

Słowa kluczowe: Nukleosynteza, Wielki Wybuch, cykl protonowy, cykl CNO.

Abstract: According to modern cosmology, the universe was created as a result of the Big Bang. All the underlying physical interactions were consolidated. Immediately after the Big Bang, there was a rapid expansion of the universe called inflation. At that time, its temperature dropped sharply, and the size of the Universe increased by several dozen orders of magnitude. There is as yet no coherent scientific theory regarding the formation of baryons. A few minutes after the creation of the Universe, the Big Bang Nucleosynthesis began. The baryons then formed hydrogen and deuterium, as well as helium and small amounts of lithium. Elements heavier than lithium were formed much later by spallation, stellar nucleosynthesis, in evolving and exploding stars. A perfect example of fusion is the Sun. It draws its energy from the proton cycle and the Bethe-Weizsacker cycle, also called CNO.

Keywords: Nucleosynthesis, Big Bang, proton cycle, CNO cycle.

Wielki Wybuch

Wszechświat powstał w wyniku Wielkiego Wybuchu (BB – ang. *Big Bang*), gdy jego gęstość i temperatura były (prawie) nieskończone, i znajdowały się w najbardziej symetrycznej formie [1, 2]. W tym czasie wszystkie podstawowe oddziaływania fizyczne, takie jak oddziaływania grawitacyjne, elektromagnetyczne, silne i słabe, były ze sobą skonsolidowane. Ze względu na dynamiczną ekspansję Wszechświata temperatura szybko obniżała się, a oddziaływania podstawowe zostały rozdzielone. Około 10^{-36} sekundy po Wielkim Wybuchu Wszechświat przeszedł przez bardzo krótką i szybką ekspansję zwaną inflacją. W przedziale czasowym pomiędzy 10^{-35} a 10^{-30} sekundą Wszechświat powiększył się 10^{26} razy, a nawet

10^{100} krotnie. Było to prawdopodobnie wynikiem wyodrębnienia oddziaływań silnych.

Uważa się, że kosmiczna inflacja jest odpowiedzialna za istnienie jednorodności w obecnym Wszechświecie, a jednocześnie za tworzenie się w nim struktur. Z jednej strony inflacja spowodowała rozciągnięcie przestrzeni i eliminację jej defektów, z drugiej zaś fluktuacja kwantowa inflacji (pola napędzającego inflację) doprowadziła do powstania zarodków galaktyk. Kilka minut później zaczęły się formować jądra atomowe. Bariony¹ zaczęły się łączyć w jądra atomowe, wytwarzając w ten sposób wodór, hel i śladowe ilości litu. Nukleosynteza Wielkiego Wybuchu (BBN – ang. *Big Bang Nucleosynthesis*) trwała do momentu, gdy temperatura i gęstość barionów okazały się zbyt niskie do dalszej nukleosyntezy.

¹ Bariony: protony i neutrony.

Po inflacji i pierwotnej nukleosyntezie niewiele się zmieniło we Wszechświecie przez następne sto tysięcy lat. Wszechświat nadal się rozszerzał, stopniowo ochładzając się, aż do momentu gdy jego temperatura obniżyła się do kilku tysięcy Kelvinów. W tym momencie gęstość Wszechświata wynosiła średnio 10^{-21} g/cm³. Wszechświat był wówczas plazmą². Po tym czasie elektrony były przyłączane przez jądra atomów wodoru i helu, tworząc elektrycznie obojętne atomy gazu.

Ostatnie obserwacje mikrofalowego promieniowania tła (CMB – ang. *Cosmic Microwave Background*) prowadzone z satelitów Wilkinson Microwave Anisotropy Probe i Planck potwierdziły istnienie kosmologii inflacyjnej i umożliwiły określenie parametrów kosmologicznych z niespotykaną jak dotychczas dokładnością. Około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu Wszechświat ochłodził się do temperatury poniżej 3000–4000 K. Fotony oddzielone zostały wówczas od materii, tworząc swobodnie poruszające się wiązki. Promieniowanie CMB zostało po raz pierwszy wykryte przez A. Penziasa [3] i R. Wilsona w 1964 roku, a w 1978 roku otrzymali oni za swoje niezwykłe odkrycie Nagrodę Nobla [4]. W 1989 roku misja kosmiczna COBE (ang. *Cosmic Background Explorer*) przeprowadziła szczegółowe obserwacje mikrofalowego promieniowania tła (CMB). Doprowadziło to do odkrycia przez J. Mathera [5] i G. Smoota [6] anizotropii promieniowania CMB, za co obydwaj uczeni otrzymali w 2006 roku Nagrodę Nobla. Niewielkie zmiany temperatury i gęstości materii wykryte na mapie nieba to „nasiona”, z których powstaną galaktyki i gromady galaktyk widoczne we współczesnym Wszechświecie.

Przeprowadzone eksperymenty dowiodły, że Wszechświat składa się z 4,9% barionów (atomów), z 26,6% ciemnej materii i z 68,4% ciemnej energii. Skład Wszechświata przedstawiono w tabeli 1. Ciemna materia i ciemna energia charakteryzują się przeciwstawnymi oddziaływaniami grawitacyjnymi. Ciemna materia wykazuje przyciąganie grawitacyjne, natomiast ciemna energia ma charakter odpychający (antygravitacyjny). Właściwości swoiste ciemnej materii i ciemnej energii są obecnie poznane w niewielkim stopniu. W każdym razie należy zdawać sobie sprawę z tego, że modele inflacyjne, ekspansja Wszechświata, CMB i nukleosynteza Wielkiego Wybuchu stanowią podstawę rozwoju współczesnej kosmologii. Historię powstawania Wszechświata od inflacji do chwili obecnej przedstawiono na rysunku 1.

Następnie Wszechświat wszedł w kosmiczne Wiek Ciemne. Nie było wówczas gwiazd ani światła gwiazd. W tym czasie obecne były tylko obłoki wodoru i helu. Kilkaset milionów lat po Wielkim Wybuchu materia zapadła się w mini-halo³, które stało się miejscem narodzin pierwszych gwiazd. Działo się tak, ponieważ wytworzyły się wówczas studnie grawitacyjne, które zatrzymywały gaz

Tabela 1. Skład Wszechświata. Gęstość krytyczna (ρ_c) Wszechświata odpowiada wartości przewidywanej przez teorię inflacji. Atomy stanowią zaledwie 4,9% zawartości Wszechświata. Wśród nich widoczne są atomy (gaz i galaktyki) jeszcze rzadsze. Większość barionów (wodór i hel) pozostaje w ośrodku międzygalaktycznym. Fotony „kopalne” (CMB) reprezentują niewielki ułamek gęstości energii Wszechświata, pomimo iż są powszechnie występujące ρ_c / c .

Table 1. Composition of the Universe. The critical density (ρ_c) of the universe corresponds to the value predicted by the theory of inflation. Atoms make up only 4.9% of the universe. Among them are visible atoms (gas and galaxies) even rarer. Most of the baryons (hydrogen and helium) stay in the intergalactic medium. „Fossil” photons (CMB) represent a tiny fraction of the universe’s energy density, despite being ubiquitous ρ_c / c .

Gęstość Wszechświata 10 ⁻²⁹ g/cm ³		
CMB	R	5·10 ⁻⁵
Widzialne atomy (gaz i galaktyki)	L	0,003
Bariony (atomy)	b	0,049
Ciemna materia	m	0,266
Ciemna energia	Ė	0,648
Suma	T	1

niezbędny do formowania się gwiazd. Światło pierwszych gwiazd zakończyło istnienie ciemnych wieków Wszechświata. Te pierwsze gwiazdy były odpowiedzialne za powstanie złożonych jąder atomowych węgla i tlenu. Odegrały one również kluczową rolę w globalnej ewolucji Wszechświata.

Podsumowując, na początku cała przestrzeń i czas, cała energia i materia wyłoniły się z formy symetrycznej, którą możemy dziś odtworzyć jedynie w abstrakcyjnych równaniach stanu. Historia Wszechświata od tej najwcześniejszej chwili była sagą o stale rosnącej asymetrii i wzrastającej złożoności.

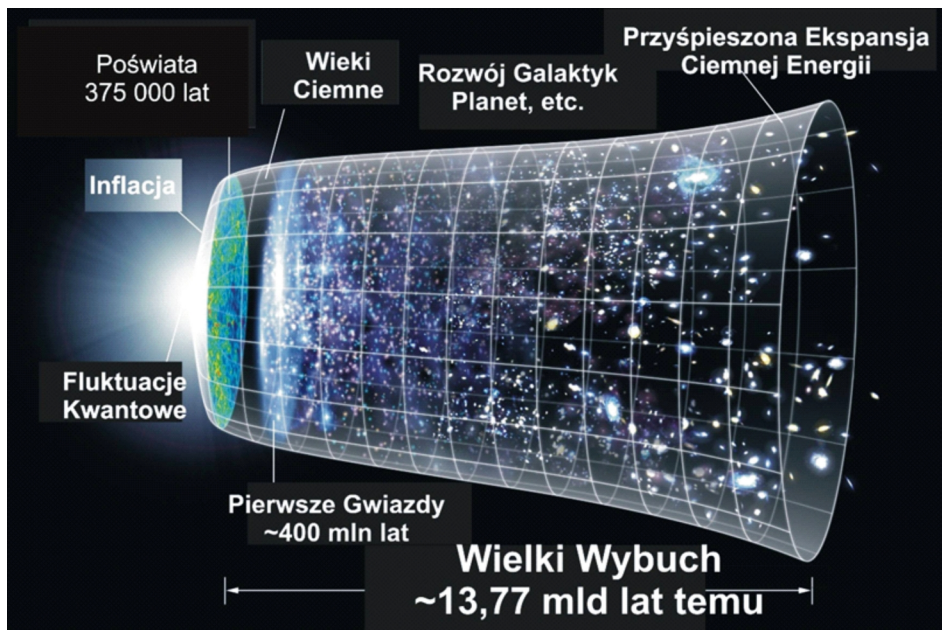
W miarę rozszerzania się przestrzeni kosmicznej i ochładzania Wszechświata cząstki zaczęły ulegać procesowi agregacji. Z gorącej plazmy zaczęły się tworzyć złożone struktury. W końcu pojawiły się gromady i galaktyki, gwiazdy, planety, a nawet samo życie. W co najmniej jednym zakątku kosmosu, gdzie warunki były idealne, inteligentne istoty ewoluowały do momentu, w którym mogły zacząć rozumieć te fantastyczne początki. Istoty te to ludzie, którzy wciąż manipulują przy strukturze materii, tworząc m.in. broń jądrową. Przede wszystkim od Wielkiego Wybuchu Wszechświat nieustannie ewoluuje.

Powstanie barionów

Paul Dirac w 1931 roku przewidział istnienie antymaterii [7]. Jest to jedno z najbardziej imponujących odkryć. Antymateria składa się z antycząstek, które mają takie same, np. masy, lub przeciwne, np. ładunki elektryczne,

² Plazma to fizyczny stan materii, w którym protony, fotony i elektrony funkcjonują jako oddziałujące ze sobą jony.

³ Mini-halo to słaby, rozproszony obszar emisji radiowej, który otacza gromadę galaktyk.



Rys 1. Kosmiczna oś czasu. Evolucja Wszechświata od Wielkiego Wybuchu do chwili obecnej. Po Ciemnych Wiekach pierwsze gwiazdy pojawiły się około 400 mln lat po Wielkim Wybuchu, a następnie zaczęły się rozwijać galaktyki. Ostatnie obserwacje sugerują, że ekspansja Wszechświata przyspiesza z powodu istnienia ciemnej energii (źródło: rycina na podstawie Domeny Publicznej).

Fig. 1. Cosmic timeline. The evolution of the Universe from the Big Bang to the present. After the Dark Ages, the first stars appeared about 400 million years after the Big Bang, and then galaxies began to develop. Recent observations suggest that the expansion of the Universe is accelerating due to dark energy (source: figure based on Public Domain).

właściwości. Antycząstki, po spotkaniu z cząstkami, anihilują, wytwarzając głównie fotony. Symetria między materią a antymaterią skłoniła uczonego Paula Diraca do stwierdzenia, że „być może istnieje zupełnie nowy Wszechświat zbudowany z antymaterii”. Teraz wiemy, że antymateria istnieje, ale we Wszechświecie jest widocznych niewiele antycząstek. Tak więc antyprotony (antyproton to proton, obdarzony ujemnym ładunkiem elektrycznym) występują tak rzadko, że nie są w stanie tworzyć obiektów makroskopowych. W tym kontekście wyzwaniem jest wyjaśnienie, dlaczego antymateria jest tak rzadka (prawie nieobecna) w obserwowanym obecnie Wszechświecie.

Bariogeneza to generowanie protonów i neutronów oraz eliminacja odpowiadających im antycząstek, implikująca pojawienie się jąder wodoru. Ma ona kluczowe znaczenie dla kosmologii. Niestety problem jest w zasadzie nierozwiązany. Jedynie ogólne warunki bariogenezy zostały sformułowane przez A. Sacharowa [8]. Bariogeneza wymaga co najmniej odstąpienia od równowagi termicznej i naruszenia podstawowych zasad symetrii. Prowadzi to do silnej asymetrii obserwowanej materii – antymaterii. Dzieje się tak już na poziomie proton – foton, w którym na jeden proton przypada 10^{12} fotonów.

Mechanizmy powstawania materii-antymaterii silnie zależą od temperatury ponownego nagrzewania Wszechświata, pod koniec inflacji, oraz od maksymalnej temperatury osiągananej we wczesnym Wszechświecie. Wyniki eksperymentalne pochodzące z Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC – ang. *Large Hadronic Collisionner*) w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN – fr. *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*) w Genewie,

obserwacje astrofizyczne i misja satelity Planck znacznie zawęziły bariogenezę, a tym samym dostarczyły uczonym cennych informacji na temat powstawania gorącego Wszechświata w początkowym okresie.

Nukleosynteza Wielkiego Wybuchu

Tuż po fazie bariogenezy, a przed erą nukleosyntezy Wszechświat składał się głównie z elektronów, pozytonów, fotonów, neutrin oraz barionów.

W kosmologii fizycznej nukleosynteza Wielkiego Wybuchu to powstanie jąder atomowych z najlżejszego izotopu wodoru. W standardowej kosmologii Wielkiego Wybuchu żaden z pierwiastków chemicznych nie istniał od samego początku powstania Wszechświata. Panująca wówczas temperatura uniemożliwiała ich tworzenie. Temperatura w tym czasie przekraczała 10 mld Kelwinów, czyli była około milion razy wyższa niż dzisiejsza temperatura powierzchni Słońca. Mniej więcej jedną sekundę po Wielkim Wybuchu Wszechświat rozszerzył się i ochłodził do temperatury, w której zaczęły obowiązywać reguły fizyki jądrowej. Poszczególne protony i neutrony zaczęły się łączyć ze sobą, tworząc cięższe, bardziej złożone jądra.

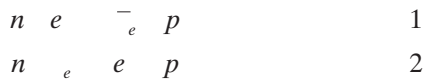
W krótkim okresie zwanym „erą nukleosyntezy” Wszechświat stał się reaktorem termojądrowym, w którym formowały się jądra najlżejszych pierwiastków. Powstał wówczas cały obecny wodór i deuter, prawie cały obecny hel i bardzo niewielka ilość litu. Pozostałości powstałych wtenczas pierwiastków lekkich są wykrywalne w kosmosie

do dziś. Dostarczają one ważnych informacji o wczesnych warunkach panujących w czasie powstawania Wszechświata i dowodzą, że znajdował się on w początkowej fazie swego istnienia w bardzo gorącym, skondensowanym stanie. Otrzymane informacje umożliwiają uczonym poprawne oszacowanie średniej gęstości normalnej materii w dzisiejszych czasach.

Warunki panujące we Wszechświecie, w szczególności energie kinetyczne cząstek, w tej epoce nie różniły się zbyt od tych, które badali na Ziemi fizycy jądrowi, co oznacza, że ewolucja Wszechświata jest poprawnie rozumiana. Mamy zatem pewność, że opierając się na posiadanej wiedzy z zakresu fizyki jądrowej, możemy wypowiadać się na temat kosmologii tej epoki.

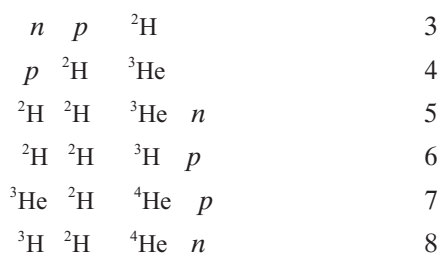
Kluczem do zrozumienia fizyki tego okresu jest pojęcie równowagi termicznej. Zjawisko to reprezentuje stan równowagi pomiędzy przeciwnymi reakcjami jądrowymi. Kiedy układ jest w równowadze termicznej, to jego temperatura określa względne ilości różnych, oddziałujących ze sobą form, w tym jąder atomowych, które są obecne. Gdy Wszechświat znajdował się w równowadze termicznej, jego temperatura regulowała stosunek ilości neutronów do protonów (n/p).

Jeszcze przed pierwszą sekundą temperatura Wszechświata przekroczyła dziesięć miliardów Kelwinów. Ilość neutronów i protonów była wówczas prawie równa, ponieważ cząstki o tej samej masie łatwo przekształcały się w siebie nawzajem (równania 1 i 2).

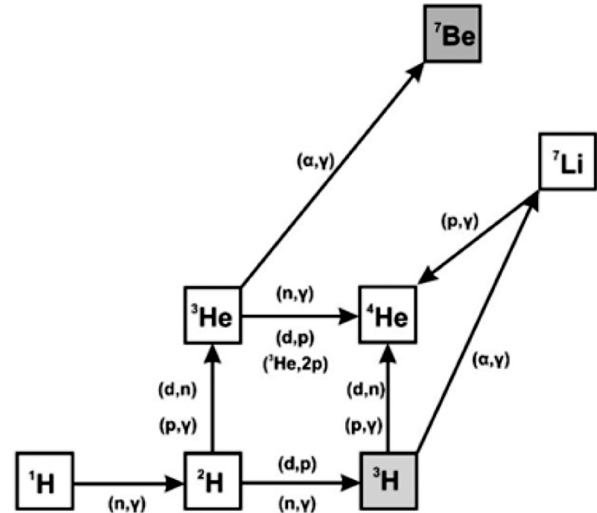


Po dziesięciu sekundach temperatura Wszechświata obniżyła się do trzech miliardów Kelwinów. Reakcje odpowiedzialne za otrzymywanie neutronów z protonów spowolniły, a stosunek n/p obniżył się do $1/6$. Warunki te noszą nazwę temperatury zamrażania. Jednak swobodne neutrony są niestabilne, a ich średni czas życia wynosi 880 sekund. Stąd też, w miarę jak Wszechświat stale się rozszerzał i ochładzał, stosunek n/p nadal malał. Niektóre neutrony rozpadły się w ciągu następnych kilku minut, zanim umożliwiły powstanie nowych jąder atomowych, czyli fuzję. Po około dwustu sekundach stosunek n/p wyniósł $1/7$. Wtedy temperatura Wszechświata obniżyła się do takiej wartości, w której protony i neutrony połączyły się, tworząc jądra deuteru ^2H . Był to punkt wyjścia do dalszej nukleosyntezy.

Bariony i jądra pierwiastków podlegały reakcjom fuzji (równania 3–8):



Reakcje o niewielkim przekroju czynnym doprowadziły do powstania ^7Li lub ^7Be . Na rysunku 2 przedstawiono diagram nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu. Zasadniczo wszystkie pierwiastki, które są cięższe od litu, powstały znacznie później, w wyniku spallacji, gwiazdnej nukleosyntezy, w ewoluujących i wybuchających gwiazdach (rys. 3).



Rys. 2. Diagram nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu. Ramki z szarym wnętrzem oznaczają niestabilne jądra. Gdy wszystkie reakcje ustają, niestabilny ^7Be rozpada się na ^7Li , a ^3H rozpada się na ^3He (źródło: [2]).

Fig. 2. Big Bang nucleosynthesis diagram. Boxes with a gray interior indicate unstable kernels. When all reactions stop, unstable ^7Be decays to ^7Li and ^3H decays to ^3He (source: [2]).

Nukleosynteza Wielkiego Wybuchu cechowała się kilkoma istotnymi właściwościami. Już w pierwszej sekundzie nastąpiło ustalenie się stosunku ilości protonów i neutronów. Wszechświat był niemalże jednorodny i zdominowany jedynie przez promieniowanie, które było oddzielone od materii. Fuzja jąder następowała od około 10 sekundy do 20 minut po Wielkim Wybuchu. Temperatura panująca w tej fazie we Wszechświecie była na tyle niska, aby mógł przetrwać deuter, lecz jednocześnie gęstość i temperatura Wszechświata były na tyle wysokie, że proces fuzji mógł zachodzić ze stosunkowo wysoką częstotliwością.

Kluczowym parametrem pozwalającym na oszacowanie rozmiarów nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu jest stosunek liczby barionów do fotonów, który jest rzędu $6 \cdot 10^{-10}$. Ten parametr związany jest z gęstością barionów i jest odpowiedzialny za szybkość, z jaką nukleony zderzają się i reagują ze sobą. Na tej podstawie można było obliczyć liczebność populacji pierwiastków po zakończeniu nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu. Chociaż stosunek ilości barionów do fotonów jest ważny przy określaniu liczebności pierwiastków, to wprowadzenie jego wartości do modeli obliczeniowych powoduje powstanie pewnych rozbieżności z danymi eksperymentalnymi. Bez większych poprawek do teorii nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu rozwiązanie prowadzi do konkluzji, że w jego wyniku powstało 75% istniejącego wodoru, około 25% ^4He oraz około 0,01% deuteru i ^3He , jak również śladowe ilości litu

(rzędu 10^{-10}) i pomijalnie małe ilości cięższych pierwiastków. To, że obserwowane ilości nuklidów we Wszechświecie są ogólnie zgodne z tymi wartościami, można uznać za istotny dowód na poparcie teorii Wielkiego Wybuchu.

Powstanie pierwiastków lekkich podczas nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu opisywane jest przez kilka parametrów. Dwa z nich są szczególnie istotne. Są to, określane na podstawie Standardowego Modelu fizyki, stosunek n/p oraz stosunek barionów do fotonów.

Przewiduje się, że około 8% wszystkich atomów powinienn stanowić ${}^4\text{He}$, co stanowi jego udział masowy na poziomie około 25%. Jest to zgodne z obserwacjami. Powstały również śladowe ilości deuteru i trytu.

Stosunek barionów do fotonów jest kluczowym parametrem określającym liczebność pierwiastków lekkich w chwili zakończenia nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu.

Należy zauważyć, że nie ma stabilnych jąder o liczbach masowych 5 lub 8. Oznacza to, że nie zachodziły reakcje fuzji barionu (nukleonu) i ${}^4\text{He}$ lub fuzja dwóch jąder ${}^4\text{He}$. Większość łańcuchów fuzyjnych podczas nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu ostatecznie kończy się na ${}^4\text{He}$, podczas gdy „niekompletne” łańcuchy fuzji prowadzą do powstania niewielkich ilości ${}^2\text{H}$ lub ${}^3\text{He}$. Ilość tych nuklidów zmniejsza się wraz ze wzrostem stosunku barion-foton. Oznacza to, że im większy jest ten stosunek, tym więcej zachodzi reakcji i tym wydajniej deuter zostaje przekształcony w ${}^4\text{He}$. Oznacza to też, że deuter jest bardzo przydatnym markerem do pomiaru stosunku barion-foton. Deuter jest bardzo delikatnym pierwiastkiem. Posiada on jądro nieparzysto-nieparzyste, łatwo ulegające zniszczeniu w gwiazdach. Jego początkowa liczebność jest określana na podstawie obserwacji chmur obecnych na linii widzenia odległych kwazarów (bardzo odległych galaktyk pierwotnych) [9, 10, 11]. Deuter był produkowany tylko w czasie nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu.

Ułamek masowy ${}^4\text{He}$, który powstał w czasie nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu oraz w trakcie ewolucji gwiazd, stosuje się do tzw. ekstrapolacji do zerowej metaliczności⁴. Pierwotna liczebność litu określona została na podstawie obserwacji gwiazd o niskiej metaliczności w aureoli naszej Galaktyki, gdzie obfitość litu jest prawie niezależna od metalizacji [12].

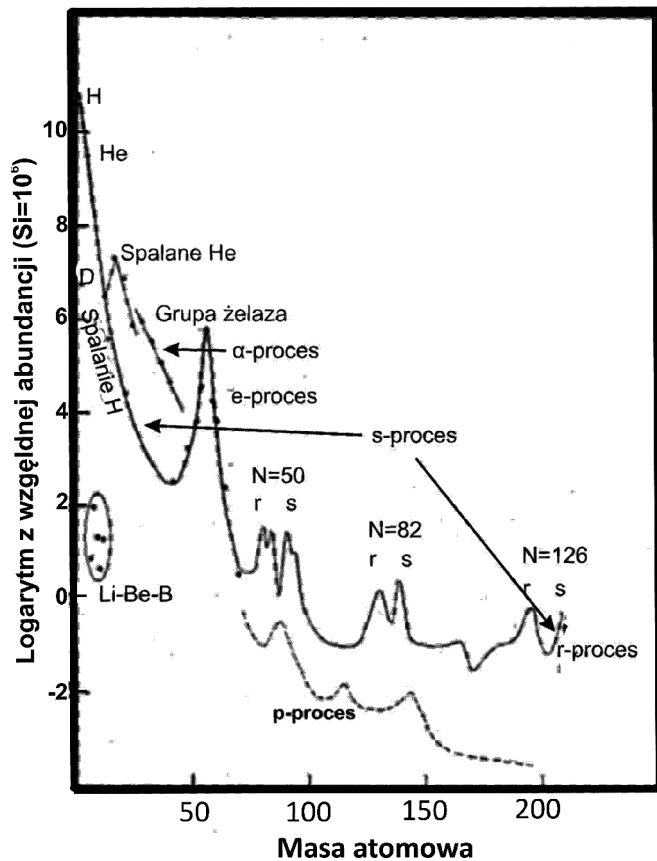
Nukleosynteza zderzeniowa: pochodzenie i ewolucja litu, berylu i boru

Pochodzenie i ewolucja rzadkich pierwiastków: Lit–Beryl–Bor (LiBeB) – stanowi punkt odniesienia dla różnych dziedzin astrofizyki, takich jak np.: spektroskopia, nukleosynteza nietermiczna, gwiazdowa nukleosynteza i teoria ewolucji galaktyk. Rzeczywiście LiBeB są rzadkimi pierwiastkami, ponieważ ulegają zniszczeniu w gwiazdach.

Na rysunku 3 przedstawiono częstotliwość występowania poszczególnych pierwiastków i ich izotopów we Wszechświecie. Widoczne są rozrzuty liczebności poszczególnych pierwiastków w stosunku do krzywej. Ogólny charakter rozkładu częstotliwości występowania poszczególnych pierwiastków i ich izotopów jest wiarygodny. Widoczny jest nadmiar jąder dla $A = 16, 20, 40$ w stosunku do sąsiednich jąder alfa. Szczegółowe wyjaśnienia tych zjawisk podano w tabeli 2. Widoczny jest pik przy jądrach grupy żelaza i bliźniacze piki przy $A = 80, 90, 130, 138, 194$ i 208. Na rysunku 3 występuje odwołanie do procesów odpowiadających za powstanie poszczególnych pierwiastków. Definicje tych procesów przedstawiono poniżej.

- **Spalanie wodoru** (ang. *H-burning*) to proces odpowiedzialny za produkcję większości energii we wnętrzu gwiazd. Przez spalanie wodoru w fuzji pierwiastków rozumiemy cykle syntezy helu z wodoru i syntezy izotopów węgla, azotu, tlenu, fluoru, neonu i sodu, które nie są wytwarzane w procesach spalania helu i s-procesie.
- **Spalanie helu** (ang.: *He-burning*) to proces odpowiedzialny za syntezę węgla z helu, a następnie wychwyt cząstki w czasie powstawania atomów ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$ i prawdopodobnie ${}^{24}\text{Mg}$.
- **-proces** obejmuje reakcje, w których cząstki są sukcesywnie dodawane do ${}^{20}\text{Ne}$ w celu syntezy ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{36}\text{Ar}$, ${}^{40}\text{Ca}$ i prawdopodobnie ${}^{44}\text{Ca}$ i ${}^{48}\text{Ti}$. Źródła cząstek w -procesie i procesie spalania helu są różne.
- **e-proces** to proces równowagowy, w którym w warunkach wysokiej temperatury i gęstości syntetyzowane są pierwiastki wchodzące w skład piku żelaza (wanad, chrom, magnez, żelazo, kobalt, nikiel).
- **s-proces** to proces, w którym wychwyt radiacyjny neutronu (n ,) z emisją promieniowania następuje w bardzo długiej skali czasowej, począwszy od około 100 do 10^5 lat na każde pojedyncze zdarzenie. Wychwyt neutronu następuje z niską częstotliwością w porównaniu do odwrotnego do niego zjawiska – procesu rozpadu. Ten rodzaj fuzji jest odpowiedzialny za powstawanie większości radionuklidów z przedziału 23 A 46 (wyjąwszy te wytworzone podczas -procesu oraz znaczną ilość radionuklidów z przedziału 63 A 209). Proces ten jest odpowiedzialny za powstanie pików o liczbach masowych równych odpowiednio $A = 90, 138$ i 208 na wykresie częstotliwości występowania pierwiastków we Wszechświecie (rys. 3).
- **r-proces** to proces wychwytu neutronu w bardzo krótkim przedziale czasowym: od około 0,01 s do 10 s. Procesy rozpadu beta przeplatają się z wychwytem neutronów. Proces wychwytu neutronu charakteryzuje się większą częstotliwością zachodzenia reakcji w porównaniu z rozpadem beta. Ten typ fuzji jest odpowiedzialny za powstanie dużej ilości nuklidów z zakresu 70 A 209, jak również odpowiada za syntezę

⁴ Metaliczność w astrofizyce reprezentuje wszystkie pierwiastki cięższe od He.



Rys. 3. Częstotliwość występowania pierwiastków w zależności od masy atomowej oraz procesy prowadzące do ich powstania (źródło: [15]).

Fig. 3. The frequency of occurrence of elements depending on the atomic weight and the processes leading to their formation (source: [15]).

Tabela 2. Właściwości krzywej częstotliwości występowania pierwiastków.

Table 2. Properties of the element frequency curve.

Właściwość	Przyczyna
Ekspontencjalny spadek krzywej w zakresie od wodoru do pierwiastka o liczbie masowej $A = 100$.	Obniżająca się częstotliwość fuzji dla zwiększającej się wartości A odzwierciedla fakt, że gwiazdna ewolucja prowadząca do zaawansowanych stadiów, niezbędnych do zbudowania wysokiego A , nie jest powszechna.
Nagłe zmniejszenie się nachylenia krzywej dla $A > 100$.	Stała wartość przekroju czynnego reakcji (n, γ) . Cykliczność r-procesu.
Niska częstość występowania D, Li, Se, B, Be w porównaniu z sąsiadującymi z nimi H, He, C, N, O.	Nieefektywna produkcja, przetwarzanie we wnętrzach gwiazd nawet przy stosunkowo niskich temperaturach.
Duża częstotliwość występowania jąder alfa cząsteczkowych: ^{16}O , ^{20}Ne , ... ^{40}Ca , ^{48}Ti w stosunku do jąder sąsiednich.	Spalanie helu i α -proces są bardziej wydajne niż spalanie wodoru i s-proces w tym zakresie A .
Wyraźnie zaznaczony pik z wierzchołkiem dla ^{56}Fe .	e-proces; ewolucja gwiazd prowadząca do stanów złożonych, w których wydzielane jest maksimum energii.
Podwójne piki dla $A = 80, 130, 196$ i odpowiednio: $A = 90, 138, 208$.	Wychwyt neutronu w r-procesie; jądra magiczne ⁵ dla prekursorów $N = 50, 82, 126$, wychwyt neutronu w s-procesie; jądra magiczne dla jąder stabilnych $N = 50, 82, 126$.
Rzadko spotykane jądra bogate w protony wśród pierwiastków ciężkich.	Nie powstają w dominującym r-procesie lub s-procesie; powstają w rzadko występującym p-procesie.

⁵ Jądro magiczne, jądro atomowe, w którym liczba protonów Z lub neutronów N jest równa jednej z liczb: 2, 8, 20, 28, 50, 82, a dla neutronów także 126 (tzw. liczby magiczne); wyróżniają się spośród jąder sąsiednich wysoką energią wiązania; trwałością; są trudne do wzbudzenia i zdeformowania, bardziej rozpowszechnione w przyrodzie od innych jąder; mają szczególnie dużo izotopów lub izotonów trwałych.

uranu i toru. Proces ten jest także odpowiedzialny za syntezę kilku lekkich radionuklidów, takich jak: ^{36}S , ^{46}Ca , ^{48}Ca i prawdopodobnie ^{47}Ti , ^{49}Ti oraz ^{50}Ti . Jest on również odpowiedzialny za pojawienie się pików dla pierwiastków o liczbach masowych odpowiednio równych $A = 80, 130, 194$ na krzywej zawartości radionuklidów we Wszechświecie.

- **p-proces** to proces wychwytu protonu (p, γ) z emisją promieniowania gamma lub emisją neutronu poprzedzoną absorpcją promieniowania gamma (γ, n). Proces ten jest odpowiedzialny za syntezę szeregu radionuklidów bogatych w protony, rzadko występujących we Wszechświecie, w porównaniu do sąsiadujących z nimi na wykresie radionuklidów o standardowym składzie jąder oraz bogatych w neutrony.
- **x-proces** to proces odpowiedzialny za syntezę deuteru, litu, berylu i boru. Cechą charakterystyczną wszystkich pierwiastków wytworzonych w tym procesie jest to, że są one bardzo niestabilne w wysokich temperaturach wnętrza gwiazd. Wydaje się prawdopodobne, że zostały one wytworzone w obszarach cechujących się niską gęstością i niewielką temperaturą.

Tabela 2 przedstawia właściwości krzywej występowania nuklidów we Wszechświecie oraz związki przyczynowo-skutkowe poszczególnych zjawisk, a także procesy, które są odpowiedzialne za ich pojawienie się. Przepaść dzieli He i C. Na dole tej przepaści spoczywa trio LiBeB. Pierwiastki te charakteryzują się prostotą budowy ich jąder atomowych, które w ich przypadku składają się 6–11 nukleonów, oraz tym, że są rzadkością we Wszechświecie.

Ze względu na ekspansję Wszechświata nukleosynteza Wielkiego Wybuchu zatrzymała się na pierwiastkach o liczbie masowej $A = 7$. Produkcja i ewolucja LiBeB wynika z interakcji promieniowania kosmicznego, które składa się zasadniczo z bardzo szybkich protonów, wnika-jących w dysk galaktyczny, z ośrodkiem międzygwiazdowym.

Wyniki reakcji zderzenia jąder zależą od składu wiązki promieniowania kosmicznego i tarczy (na przykład węgla i tlenu w ośrodku międzygwiazdowym), a także od względnej prędkości pocisku i jądra tarczy. Nukleosynteza odbywa-jąca się w gwiazdach oznacza niskie energie i wysoką gęstość cząstek. Przeciwnym procesem jest nukleosynteza spalacyjna, która charakteryzuje się istnieniem wysokich energii promieniowania kosmicznego i bardzo niską gęstością materii. Energia niezbędna do utrzymania wyso-kiej gęstości energii promieniowania kosmicznego jest dostarczana głównie przez supernowe⁶, które niekoniecz-nie są źródłami jąder atomowych tworzących promienio-wanie kosmiczne, ale są czynnikiem przyspieszającym ich powstawanie.

Głównymi źródłami LiBeB są prędkie protony oddzia-łujące z węglem, azotem i tlenem (CNO) pozostające w spoczynku w przestrzeni międzygwiazdowej oraz rozszcze-pione jądra C i O, pozostających w przestrzeni między-gwiazdowej i będące w ruchu, prowadzące do powstania H i He. Masywne gwiazdy są w stanie dostarczyć świeżo zsyn-tetyzowane atomy C i O i przyspieszyć je poprzez fale uderzeniowe, które indukują w swoim otoczeniu.

Nukleosynteza w gwiazdach i ewolucja kosmiczna

Nukleosynteza w czasie formowania się gwiazd to powsta-wanie nowych jąder atomowych z pierwiastków, które powstały w czasie nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu. Nukleosynteza zachodzi w gwiazdach od momentu powstania wodoru, helu i litu podczas Wielkiego Wybuchu. Jako teoria predykcyjna dostarcza dokładnych danych dotyczących liczebności pierwiastków. Wyjaśnia, dlaczego obserwowana ilość pierwiastków zmienia się w czasie i dlaczego niektóre pierwiastki i ich izotopy występują częściej niż inne. Teoria została początkowo zaproponowana przez Freda Hoyle'a w 1946 roku [13], który później rozwinął ją w 1954 roku [14]. Dalsze postępy w dziedzinie nukleosyntezy dotyczącej wychwytu neutro-nów przez jądra pierwiastków cięższych od żelaza (łącznie z żelazem), opisali w artykule B2FH⁷ Margaret i Geoffrey Burbidge, William Alfred Fowler i Fred Hoyle [15]. Praca ta jest jednym z najczęściej cytowanych artykułów z dziedziny astrofizyki.

⁶ Supernowe: wybuchające masywne gwiazdy.

⁷ B2FH to skrótowa nazwa artykułu pochodząca od pierwszych liter nazwisk autorów.

⁸ Koalescencja to proces łączenia dwóch lub więcej cząstek w jedną większą.

Istotnym zadaniem współczesnej kosmologii jest zrozumienie końca kosmicznych Wieków Ciemnych, kiedy to pierwsze świecące obiekty (gwiazdy i galaktyki) przekształciły pierwotny Wszechświat we Wszechświat współczesny. Postęp mocy superkomputerów w ostatniej dekadzie pozwolił rozpocząć badania dotyczące powstawa-nia pierwszych gwiazd poprzez modelowanie odpowied-nich procesów fizycznych. Pierwsze scenariusze powstawa-nia gwiazd sugerują, że mogły one być masywne, o typo-wym zakresie mas około 40–100 mas Słońca (masa Słońca = $2 \cdot 10^{33}$ g). Część z nich zginęła w energetycznych wybu-chach supernowych. Te pierwsze supernowe wydzieliły znaczną ilość energii i rozprzestrzeniły pewne złożone pierwiastki do ośrodka międzygwiazdowego.

Powstanie pierwszych gwiazd przekształciło prosty, wczesny Wszechświat w bardzo skomplikowany współczes-ny. Pierwsze gwiazdy powstałe z wodoru i helu pozostałego po Wielkim Wybuchu nazywane są gwiazdami popula-cji III. Są rzadkie, masywne, o krótkim okresie życia (kilka milionów lat). Obecnie nie wykrywa się tych gwiazd. Stan-dardowy model kosmologiczny sugeruje, że kosmiczna struktura uformowała się w sposób hierarchiczny. Tak więc pierwsza generacja małych galaktyk była prawdopodobnie na swoim dotychczasowym miejscu już 400 mln lat po Wielkim Wybuchu. Galaktyki rozpoczęły wtedy fazę łącze-nia się i koalescencji⁸ z innymi galaktykami, w wyniku czego uzyskały masę od kilku milionów mas Słońca aż do setek miliardów mas Słońca.

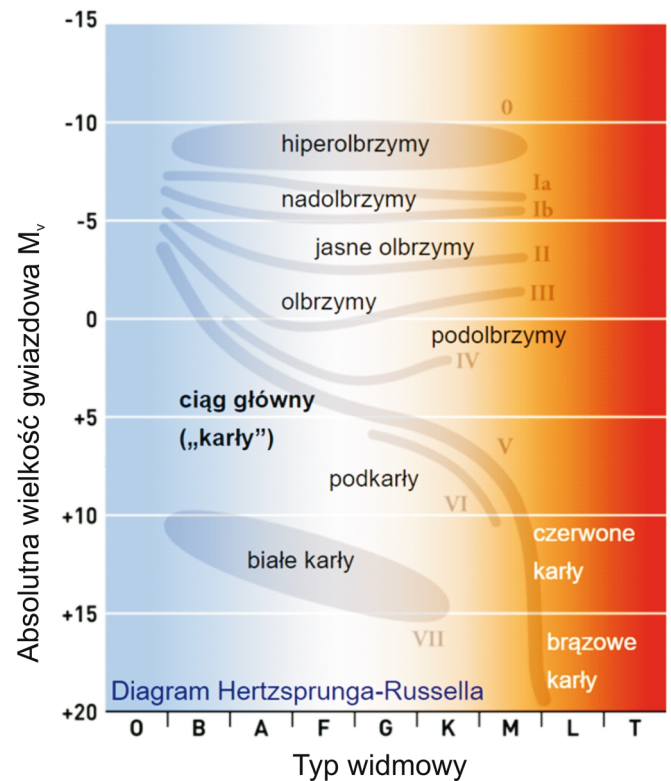
Złożona materia ulega stopniowemu formowaniu się w gwiazdach. Wszystkie ciężkie pierwiastki, takie jak węgiel, azot, tlen, krzem, glin, miedź i żelazo, powstały później w wyniku syntezy termojądrowej w jądrach gwiazd. Zostało to przedstawione w postaci diagramu Hertzsprun-ga-Russella (rys. 4) oraz diagramu nukleosyntezy zachodzącej w gwiazdach (rys. 5). Pojęcia użyte na diagramie Hertzsprunga-Russella (4) zdefiniowano poniżej:

- **Ciąg główny** to pas przebiegający wzdłuż krzywej na diagramie Hertzsprunga-Russella, w którym zgrupowa-na jest większość gwiazd z okolic Słońca.
- **Absolutna wielkość gwiazdowa** to obserwowana wiel-kość gwiazdowa, jaką miałby obiekt oglądany z pewnej ustalonej odległości, przy braku pochłaniania światła w przestrzeni międzygwiazdowej. W przypadku obiektów poza Układem Słonecznym przyjęto jako wartość odniesienia 10 parseków.
- **Typ widmowy** to klasyfikacja gwiazd oparta na widmie światła wysyłanego przez gwiazdę. Widmo światła emitowanego przez gwiazdę jest określone przez trzy podstawowe parametry atmosfery gwiazdy, a mianowicie: temperaturę, ciśnienie gazu, skład chemiczny.
- **Hiperolbrzymy** to najjaśniejsze i największe gwiazdy mające klasę jasności 0. Są one niezwykle rzadkie. Naj-

blizszy Ziemi hiperolbrzym to VV Cephei, odległy od Ziemi o około 3000 lat świetlnych. Hiperolbrzymy są nawet ponad 100 razy masywniejsze od Słońca i tysiące razy jaśniejsze od niego. Średnice niektórych hiperolbrzymów są porównywalne ze średnicą orbity Saturna. Gwiazdy te żyją bardzo krótko, około miliona lat.

- **Nadolbrzymy** to gwiazdy o masie od około 10 do 50 mas Słońca i promieniach dochodzących do ponad 1500 promieni Słońca. Ich czas życia jest krótki, od 10 do 50 mln lat. Mogą one być obserwowane w młodych strukturach, takich jak gromady otwarte, ramiona galaktyk spiralnych czy galaktyki nieregularne. Nie obserwujemy ich w jądrach spiralnych galaktyk ani w galaktykach eliptycznych.
- **Jasne olbrzymy** to gwiazdy posiadające II klasę jasności. Gwiazdy należące do tej klasy mają jasność pomiędzy olbrzymami a nadolbrzymami klasy Ib.
- **Olbrzymy** to krótkotrwałe stadium ewolucji gwiazd mające średnią masę. Moc promieniowania takiego olbrzyma jest kilkaset razy większa od mocy promieniowania Słońca.
- **Podolbrzymy** to gwiazdy jaśniejsze od gwiazd z ciągu głównego, ale nie są one tak jasne jak prawdziwe olbrzymy. Uważa się, że podolbrzymy kończą lub właśnie skończyły spalanie wodoru w swoich jądrach i zaczynają rozrastać się aż do stadium olbrzyma.
- **Podkarły** to gwiazdy należące do VI klasy jasności. Zwykle są to gwiazdy II populacji ciągu głównego. Na diagramie Hertzsprunga-Russella leżą pomiędzy karłami dysku galaktycznego a białymi karłami. Ich jasność jest o 1,5–2 magnitudo mniejsza od gwiazd ciągu głównego o identycznym typie widmowym. Charakteryzują się one niską metalicznością.
- **Białe karły** to niewielkie obiekty astronomiczne składające się ze zdegenerowanej materii, emitujące m.in. promieniowanie widzialne. Powstają po ustaniu reakcji jądrowych w gwieździe o małej lub średniej masie. Mało masywne gwiazdy nie osiągną w trakcie swojej ewolucji warunków wystarczających do zapłonu helu w reakcjach syntezy termojądrowej i powstają z nich białe karły helowe.
- **Czerwone karły** to gwiazdy ciągu głównego późnego typu widmowego (K, M, rzadko L). Gwiazdy te mają masę, rozmiary i jasność mniejszą od Słońca, a temperatury ich powierzchni są niższe niż 4000 K. Czerwone karły stanowią najliczniejszy typ gwiazd we Wszechświecie, jednak z powodu małej jasności żadna z tych gwiazd nie jest widoczna „gołym okiem” na ziemskim niebie. Na Drodze Mlecznej około 80% gwiazd jest czerwonymi karłami, w galaktykach eliptycznych ich liczba w stosunku do jaśniejszych gwiazd jest nawet 20 razy większa. Z powodu wolnego tempa syntezy wodoru w hel świecą one długo i ewoluują powoli. Szacowany czas życia czerwonych karłów sięga 10 bilionów lat (10^{13} lat).

- **Brazowe karły** to obiekty gwiazdopodobne o masach zbyt małych, by mogły zachodzić w nich reakcje przemiany wodoru w hel, które są głównym źródłem energii gwiazd ciągu głównego. Od planet-olbrzymów odróżnia je to, że są one zdolne do syntezy deuteru przynajmniej na początku swojego istnienia. Brazowe karły często występują samotnie w przestrzeni. Określa się je potocznie mianem „niewypałów”, „superplanet” bądź „nieudanych”.

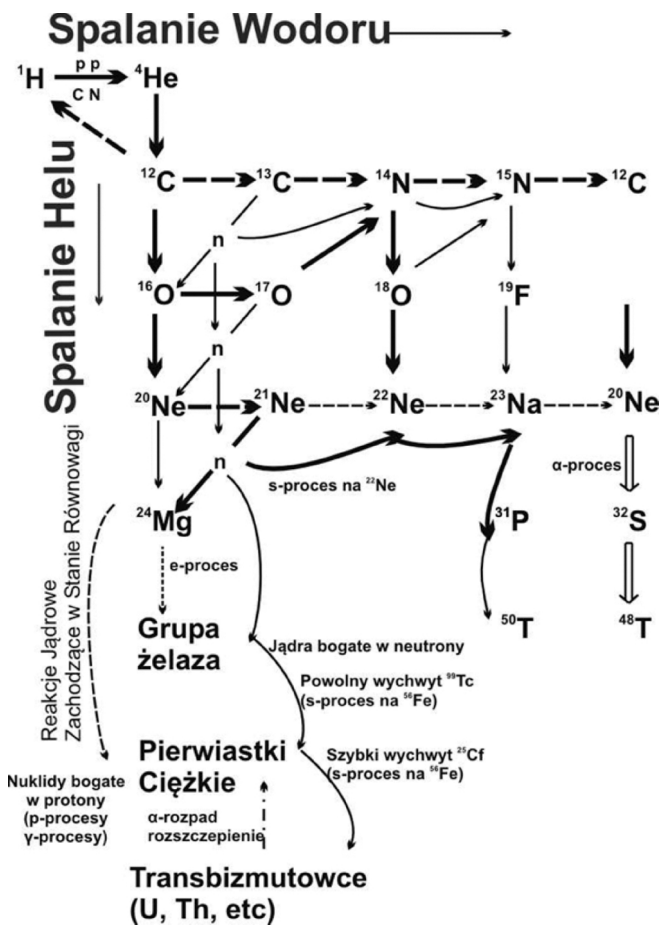


Rys. 4. Diagram Hertzsprunga-Russella przedstawia ewolucję gwiazd i na jej tle nukleosyntezę gwiazdową (źródło: rycina na podstawie Domeny Publicznej).

Fig. 4. The Hertzsprung-Russell diagram shows the evolution of stars and stellar nucleosynthesis against its background (source: figure based on Public Domain).

W galaktyce 90% gwiazd jest wielkości Słońca lub są one mniej masywne, pozostałe 10% są bardziej masywne. Gwiazdy o małej masie, takie jak Słońce, syntetyzują jądra wodoru i wytwarzają jądra helu, aby następnie przekształcić jądra helu w węgiel i azot. Tak wytworzona materia jest rozpraszana w przestrzeni międzygwiazdowej w tak zwaną fazę mgławicy planetarnej. Masywniejsze i mniej liczne gwiazdy, po wyczerpaniu wodoru, spalają hel, aby wytworzyć węgiel, tlen i wiele cięższych pierwiastków. Pierwiastki te są wyrzucane w kosmos przez gwiazdne eksplozje, supernowe, takie jak SN1987a, które pojawiły się w Wielkim Obłoku Magellana 23 lutego 1987 roku.

Zauważyć należy, że najcięższe pierwiastki (o liczbie atomowej wyższej niż żelazo) występują rzadko (rys. 3). Trzy różne mechanizmy: s-proces, r-proces i p-proces odpowiadają za produkcję tych trzech rodzajów stabilnych



Rys. 5. Diagram nukleosyntezy zachodzącej w gwiazdach (źródło: [15]).

Fig. 5. Diagram of nucleosynthesis taking place in stars (source: [15]).

pierwiastków, szybki wychwyt neutronów (r), powolny wychwyt neutronów (s) i wychwyt protonów (p). Pierwszy proces odpowiada szybkiemu wychwytowi neutronów przez ciężkie jądra (po żelazie). Te przechwycenia muszą być szybkie, aby jądra nie uległy rozpadowi. Proces ten zachodzi przy dużej gęstości wolnych neutronów, jak np. podwójne połączenie gwiazd neutronowych. Z drugiej strony, proces ten jest drugim dominującym mechanizmem produkcji ciężkich pierwiastków. Zachodzi on w gwiazdach o masie pośredniej, gdy strumień neutronów jest wystarczający do wywołania reakcji. Łącznie procesy r i s stanowią źródło większości pierwiastków cięższych od żelaza. Trzeci proces p może wystąpić w wybuchach supernowych i przy jego udziale próbuje się wyjaśnić pochodzenie ciężkich pierwiastków bogatych w protony.

Wzdłuż linii poziomych przedstawiono pierwiastki podlegające syntezie w czasie interakcji protonów (spalanie wodoru). Wzdłuż linii pionowych znajdują się pierwiastki syntezowane podczas interakcji z cząstkami alfa (spalanie helu) oraz w czasie innych bardziej skom-

plikowanych procesów. W całości pokazano szczegóły produkcji wszystkich znanych stabilnych izotopów C, N, O, F, Ne i Na. Zakrzywionymi strzałkami oznaczono procesy wychwytu neutronów, w wyniku czego następuje syntetaza pierwiastków ciężkich. Produkcja radionuklidów (przykładem może być ^{99}Tc), dla których istnieją astrofizyczne dowody, że w czerwonych olbrzymach zachodzi wychwyt neutronów w wolnym tempie, przez długie okresy. Podobnie ^{254}Cf , wytwarzany w supernowych, jest przykładem syntezy neutronów w szybkim tempie. Grupa żelaza jest wytwarzana przez różne reakcje jądrowe w ostatnim stabilnym etapie ewolucji gwiazd.

Nukleosynteza na Słońcu

Słońce jest gwiazdą⁹ typu spektralnego G2V uformowaną na drodze kolapsu grawitacyjnego z obłoku pyłu około 4,6 mld lat temu. Jest to gwiazda drugiego pokolenia, czyli gwiazda powstała z pozostałości po wybuchach gwiazd pierwszego pokolenia. Gwiazdy takie zawierają oprócz wodoru i helu także cięższe pierwiastki wytworzone w gwiazdach pierwszego pokolenia. Podstawowe informacje o Słońcu przedstawiono w tabeli 3.

Począwszy od XIX wieku, powstawały różne teorie wyjaśniające sposób wytwarzania energii przez Słońce [2]. Według pierwszych hipotez energia Słońca miała pochodzić z reakcji chemicznych. W 1848 roku J.R. Mayer wysunął hipotezę, że Słońce zasilane jest w energię poprzez nieustannie bombardujące jego powierzchnię meteoryty i asteroidy.

Na początku XX wieku H. Helmholtz i W. Thomson¹⁰ – Lord Kelvin stworzyli teorię, według której źródłem energii wypromieniowywanej przez Słońce jest jego energia grawitacyjna. Energia potencjalna ulegałaby konwersji w energię cieplną, pokrywając straty na promieniowanie. Energia potencjalna wytwarzana przez Słońce związana jest z energią potencjalną grawitacji (równanie 9):

$$E = \frac{C G M^2}{R} \quad 9$$

gdzie: C – stała zależna od rozkładu masy obiektu: $C \sim 1$, dla obiektu o jednorodnej gęstości; $C = 2/3$, G – stała grawitacji równa $6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^2]$, M – masa obiektu [kg], R – promień obiektu [m].

Szacunkowe obliczenia wskazują, że gdyby energia Słońca pochodziła jedynie z mechanizmu Helmholtza-Thomsona wystarczyłoby jej zaledwie na 40 mln lat świecenia Słońca, podczas gdy dane geologiczne wskazują, że życie na Ziemi w formie zależnej od Słońca istnieje od kilkuset milionów lat.

⁹ Gwiazda to kuliste ciało niebieskie, stanowiące skupisko materii utrzymanej grawitacyjnie. Przynajmniej przez część swojego istnienia emituje ona w sposób stabilny promieniowanie elektromagnetyczne (w szczególności światło widzialne). Gwiazdy powstają głównie z wodoru i helu, lecz w trakcie ich istnienia przybywa w nich atomów cięższych pierwiastków (tzw. metali).

¹⁰ William Thomson – angielski fizyk. W 1892 roku uzyskał tytuł lorda Kelvin, od rzeki Kelvin, która przepływała koło jego uczelni w Glasgow.

Tabela 3. Podstawowe informacje o Słońcu, warunki panujące wewnątrz, skład fotosfery.**Table 3.** Basic information about the Sun, conditions inside, composition of the photosphere.

Podstawowe informacje o Słońcu	
Masa	$1,9885 \cdot 10^{30}$ kg
Promień	$6,957 \cdot 10^8$ m
Moc wypromieniowywana	$3,828 \cdot 10^{26}$ W
Warunki panujące w jądrze Słońca na podstawie modelowania numerycznego	
Ciśnienie	$2,477 \cdot 10^{16}$ Pa
Temperatura	$1,571 \cdot 10^7$ K
Gęstość	$1,622 \cdot 10^5$ kg·m ⁻³
Skład fotosfery Słońca	
Główne składniki (%)	
H	90,965
He	8,889
Pozostałe składniki (ppm)	
O	774
C	330
Ne	112
N	102
Fe	43
Mg	35
Si	32
S	15

Wraz z odkryciem promieniotwórczości pojawiła się hipoteza o radioaktywności Słońca. Już w latach 20. XX wieku pojawiły się koncepcje opracowane przez A. Eddingtona i J.H. Janesa [1], że głównym źródłem energii gwiazd są reakcje jądrowe. Jednak dopiero w latach 30. S. Chandrasekhar i H.A. Bethe stworzyli teoretyczne podstawy fuzji jądrowej. W 1938 roku H.A. Bethe wykazał możliwość przemiany wodoru w hel w cyklu węglowo-azotowym [17]. W 1952 roku E.E. Salpeter opisał cykl proton-proton [18]. Dla efektywnego przebiegu tych reakcji niezbędne są temperatury rzędu milionów Kelwinów i ciśnienia rzędu milionów GPa. Utrzymanie plazmy o takich parametrach jest możliwe dzięki siłom grawitacji.

Ogólny schemat spalania wodoru w wyniku reakcji termojądrowych opisuje równanie 10:

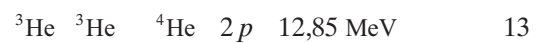


Produktami tej reakcji oprócz helu są pozytony, neutrina elektronowe i kwanty gamma. Wydzielana jest w tych reakcjach energia. Podział energii pomiędzy

neutrina i kwanty gamma jest zależny od tego, w którym cyklu zaszła reakcja. Przekształcenie jednego grama wodoru w hel powoduje uwolnienie energii o wartości $6,3 \cdot 10^{11}$ J.

Cykl protonowy

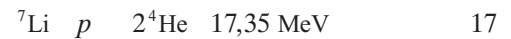
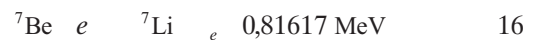
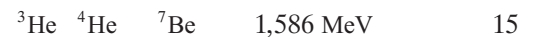
Cykl protonowy, nazywany również cyklem protonowo-protonowym lub łańcuchem p-p [19], składa się z gałęzi głównej i kilku gałęzi bocznych. Gałąź główna nazywana jest również gałęzią I cyklu protonowego (patrz równania 11–13):



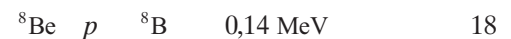
Reakcją konkurencyjną dla reakcji opisanej w równaniu 11 jest reakcja opisana przez równanie 14. Ma ona jednak czterysta razy mniejszy przekrój czynny.



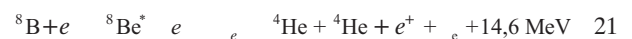
Gałąź boczna II obejmuje początkowo reakcje, które opisują równania 11 i 12 oraz kolejno następujące reakcje opisane przez równania 15–17:



Gałąź boczna II obejmuje na początku reakcje opisane przez równania 11, 12 i 15. Ta ostatnia reakcja jest wspólna zarówno dla gałęzi II, jak i gałęzi III. Kolejno następujące reakcje opisane przez równania 18–20.

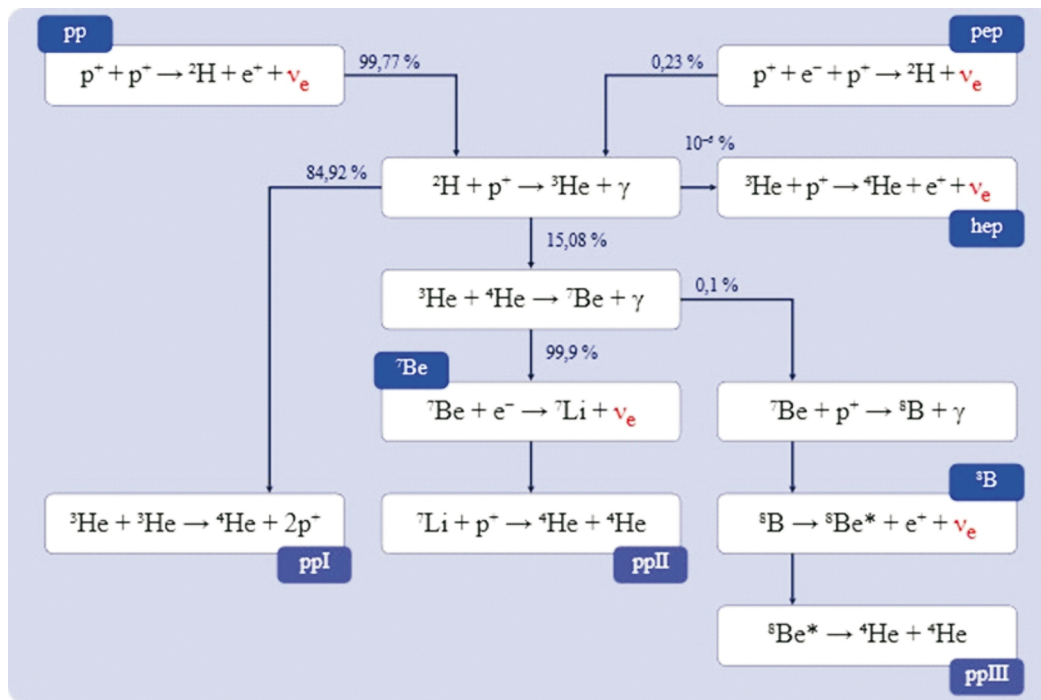


Reakcją konkurencyjną do reakcji z równania 19 jest reakcja opisana przez równanie 21.



Oddziaływania słabe są odpowiedzialne za szybkość reakcji (patrz równanie 11). Stąd też przekrój czynny na tę reakcję jest stosunkowo niski. Dla cząstek o energii mniejszej od 1 MeV przekrój czynny na reakcję jest mniejszy od 10^{-23} b. Szybkość tej reakcji ogranicza wydajność całego cyklu p-p. Inne reakcje wywoływane przez oddziaływania słabe to reakcje wychwytu elektronów i reakcje przemiany beta+. Schemat graficzny cyklu protonowego przedstawiono na rysunku 6.

Dla Słońca wydajność gałęzi głównej cyklu protonowego wynosi 91%, I gałęzi bocznej – 9%, a II gałęzi bocznej – 0,01%. Cykl protonowy odpowiada za 99% wytworzonej przez Słońce energii. Około 1% powstaje w cyklu CNO.



Rys. 6. Cykl protonowy. Licencja Creative Commons (źródło: na podstawie Domeny Publicznej).
 Fig. 6. Proton cycle. Creative Commons Licence (source: based on Public Domine).

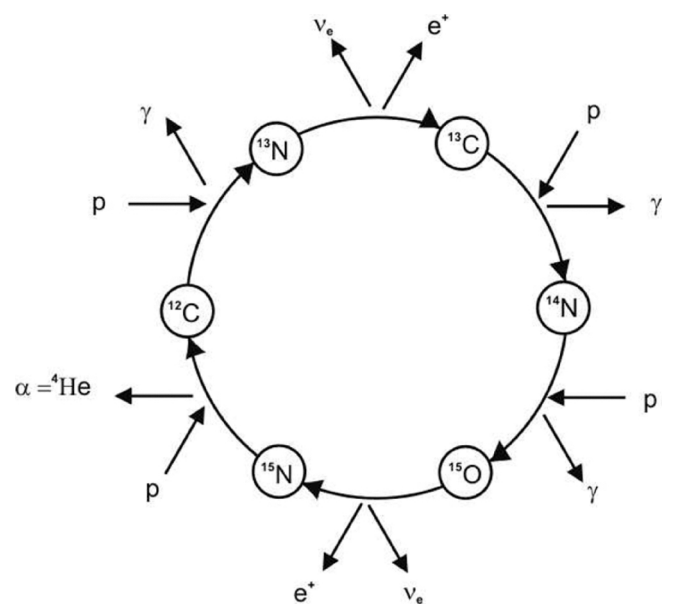
Cykl CNO

We wnętrzu gwiazd o masie mniejszej niż 1,2 masy Słońca i temperaturze wewnętrznej poniżej temperatury Słońca większość energii jest produkowana w cyklu protonowym. Pierwsze z reakcji obejmują konwersję protonu w neutron, poprzez oddziaływania słabe i bardzo powolne. Tłumaczy to długowieczność gwiazd czerpiących energię z tego typu reakcji spalania wodoru. We wnętrzu masywnych gwiazd o wysokiej temperaturze proces spalania wodoru zachodzi w wyniku istnienia cyklu CNO. Nosi on również nazwę cyklu węglowo-azotowego, cyklu Bethego lub cyklu Bethego-Weizsackera. Radionuklidy C, N oraz O (powstałe we wcześniejszych procesach generowania gwiazd) pełnią funkcję katalizatorów. Liczebność jąder cyklu CNO pozostaje stała podczas spalania wodoru, ale następuje ich wewnętrzne przekształcenie. Głównymi nukleonami produkowanymi w czasie cyklu CNO są ¹²C i ¹⁶O przekształcane w ¹⁴N oraz w niewielkiej ilości ¹³C i ¹⁷O.

Istotna różnica między cyklem protonowym a cyklem CNO dotyczy zależności szybkości produkcji energii w funkcji temperatury. W przypadku cyklu protonowego szybkość produkcji energii skaluje się jak T^4 , natomiast w przypadku cyklu CNO skaluje się jako T^{18} . Różnica ta wynika z efektu istnienia barier kulombowskich między reagentami, które są wyższe w tym drugim przypadku. Silna zależność temperaturowa CNO ma ważną implikację: energia wytwarzana lokalnie przez cykl CNO może być transponowana tylko przez konwekcję, co oznacza, że wewnątrz gwiazdy staje się chemicznie jednorodna (tj. liczebność nuklidów jest jednorodna

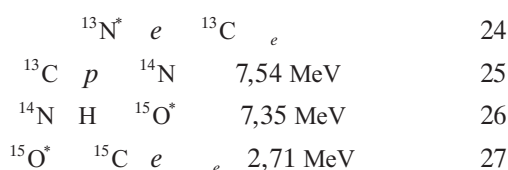
w obszarze konwekcyjnym). Przeciwna sytuacja występuje w przypadku Słońca i gwiazd o małej masie. W tym przypadku energia jest transponowana przez promieniowanie. We wnętrzach takich gwiazd liczebność reagujących jąder i ich produktów zmienia się płynnie wraz z promieniem.

Gałąź główną cyklu CNO stanowią reakcje opisane przez równania 22–24:

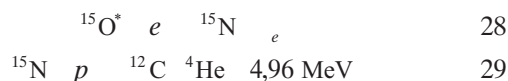


Rys.7. Cykl CNO powstały na skutek spalania wodoru (źródło: [2]).
 Fig. 7. After completing H-burning the cycle CNO occurs (source: [2]).

Reakcjami konkurencyjnymi do reakcji opisanej w równaniu 22 są reakcje opisane równaniami 24–27.



Reakcjami konkurencyjnymi dla reakcji opisanej w równaniu 27 są reakcje opisane równaniami 28 i 29.



Gwiazdki umieszczone przy symbolach pierwiastków oznaczają ich stan wzbudzony.

Obserwacje astronomiczne umożliwiają wyznaczenie takich parametrów Słońca, jak jego masa, promień czy wypromieniowywana moc, ale nie dostarczają informacji o procesach zachodzących w jego części centralnej. Jedynymi cząstkami, które wydostają się z jądra Słońca praktycznie bez oddziaływań są neutrino. Obserwacje neutrin słonecznych dostarczają informacji o reakcjach jądrowych zachodzących wewnątrz Słońca.

Notka o autorach

Jacek Kaczmarczyk – mgr inż. mechaniki stosowanej, pracownik naukowo-badawczy Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy. Absolwent wydziału MEIL Politechniki Warszawskiej (1984), gdzie studiował na kierunku podstawowe problemy techniki. Aktualnie zajmuje się diagnostykami miękkiego promieniowania X i diagnostykami neutronowymi.

Aneta Łukaszek-Chmielewska – adiunkt na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności w Akademii Pożarniczej w Warszawie.

Sławomir Jednoróg – dr hab.inż., profesor Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej. Ukończył Wydział Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie z tytułem magistra inżyniera o specjalności fizyka rozszczepienia jądra atomowego. Pracując w Wojskowym Instytucie Higieny i Epidemiologii uzyskał tytuł doktora nauk przyrodniczych, a następnie w Narodowym Centrum Badań Jądrowych – doktora habilitowanego nauk fizycznych. Obecnie związany z CLOR jako profesor instytutu i rzecznik dyscypliny, zajmuje się głównie badaniami w dziedzinach monitoringu radiacyjnego środowiska, spektrometrii promieniowania gamma i neutroniki.

Literatura

- Vangioni E., Casse M. (2017). Cosmic origin of the chemical elements rarely in nuclear astrophysics, *Frontiers in Life Science*, 10:1, 84–97. doi:10.1080/21553769.2017.1411838.
- Rauscher T., Patkos A. (2011). *Origin of the chemical elements*, Handbook of Nuclear Chemistry, Springer Science+Business Media B.V.
- Penzias A. A. (1965). Helium-Cooled Reference Noise Source in a 4-kMc Waveguide. *Review of Scientific Instruments*, 36, 68. doi:10.1063/1.1719329.
- Wilson R.W. (1978). The cosmic microwave background radiation, Nobel Lecture. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/wilson-lecture-1.pdf>
- Mather J. C. (2006). From the Big Bang to the Nobel Prize and Beyond, Nobel Lecture. https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/mather_lecture.pdf
- Smoot G. F. (2006). Cosmic microwave background radiation anisotropies: their discovery and utilization. Nobel Lecture. https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/smoot_lecture.pdf
- Dirac P. A. M. (1933). Theory of electrons and positrons, *Nobel Lecture*. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/dirac-lecture.pdf>
- Sakharov A.D. (1979). Baryon asymmetry of the universe. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. 76.1172–1181.
- Cooke R. J., Pettini M., Steidel Ch. C. (2018). One percent determination of the primordial deuterium abundance, *The Astrophysical Journal*, Volume 855, Number 2. doi:10.3847/1538-4357/aaab53.
- Cooke R. J., Pettini M., Nollett K. M., Jorgenson R. A. (2016). The primordial deuterium abundance of the most metal-poor damped Ly α system. *The Astrophysical Journal*, 830, 148. doi:10.3847/0004-637X/830/2/148.
- Cooke R. J., Pettini M., Nollett K. M., Jorgenson R. A., Murphy M. T., Steidel Ch. C. (2016). Precision measures of the primordial abundance of deuterium. *The Astrophysical Journal*, 781, 1. doi:10.3847/0004-637X/830/2/148.
- Spite F., Spite M. (1982). Abundance of lithium in unevolved halo stars and old disk stars: interpretation and consequences. *Astronomy and Astrophysics*, 115, 357–366.
- Hoyle F. (1946). The Synthesis of the elements from Hydrogen, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 106, Issue 5, October, Pages 343–383. doi:10.1093/mnras/106.5.343.
- Hoyle F. (1954). On nuclear reactions occurring in very hot stars. I. the synthesis of elements from Carbon to Nickel. *Journal: Astrophysical Journal Supplement*, 1, 1, 121–147. doi:10.1086/190005.
- Burbidge K. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F. (1957). Synthesis of the elements in stars, *Reviews of Modern Physics*, 29, 4, 548–647. https://cosmology.education/documents/B2FH_1957.pdf
- Eddington A. (1920). The Internal Constitution of the Stars, September, *Physics, Nature*.
- Bethe H. A. (1938). Energy production in stars. *Physical Review*. 55, 434–456. doi:10.1103/PhysRev.55.434.
- Salpeter E. E. (1952). Nuclear Reactions in the Stars. I. Proton-Proton Chain. *Physical Review*. 88, 547–554. doi:10.1103/PhysRev.88.547.

Wzorcowanie przyrządów dozymetrycznych: praktyczny przewodnik dla użytkowników

Calibration of dosimetry instruments: a practical guide for users

Alicja Jakubowska, Kamila Kempny, Zuzanna Pawłowska
Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

Streszczenie: Artykuł stanowi praktyczny przewodnik po wzorcowaniu przyrządów dozymetrycznych. Omówione zostały teoretyczne podstawy dozymetrii promieniowania jonizującego oraz problematyka wzorcowania przyrządów dozymetrycznych wraz z aspektami prawnymi. Opisano, jak prawidłowo zlecić wzorcowanie dozymetru i jak korzystać ze świadectwa wzorcowania.

Słowa kluczowe: Wzorcowanie, przyrządy dozymetryczne, ochrona radiologiczna.

Abstract: This article is a practical guide to the calibration of dosimetry instruments. It discusses the theoretical basis of ionising radiation dosimetry and the problems of calibration of dosimetry instruments together with legal aspects. It describes how to correctly order the calibration of a dosimeter and how to use the calibration certificate.

Keywords: Calibration, dosimetry instruments, radiological protection.

Rodzaje promieniowania jonizującego

Promieniowaniem jonizującym nazywamy te rodzaje promieniowania, które mają zdolność pośredniej lub bezpośredniej jonizacji ośrodka. Należą do nich strumienie fotonów, ciężkich cząstek naładowanych, elektronów i neutronów. Poszczególne rodzaje promieniowania jonizującego różnią się energią, sposobem powstawania, zasięgiem oraz mechanizmem oddziaływania z materią. Promieniowanie jonizujące występuje powszechnie w otoczeniu i pochodzi zarówno od źródeł sztucznych, jak i naturalnych. Głównymi naturalnymi źródłami narażenia w Polsce jest radon, promieniowanie kosmiczne i promieniowanie pierwiastków występujących naturalnie w skorupie ziemskiej (1). Promieniowanie jonizujące znajduje zastosowanie między innymi w diagnostyce i terapiach medycznych, badaniach nieniszczących i sterylizacji żywności.

Promieniowanie

Promieniowaniem α nazywamy promieniowanie złożone z cząstek odpowiadających jądom ${}^4_2\text{He}$, nazywanych również cząstkami α . Posiadają one dodatni ładunek elektryczny. Do jonizacji ośrodka dochodzi głównie wskutek oddziaływań elektrostatycznych. Cząstki α są emitowane

podczas rozpadów jąder niektórych pierwiastków, np. Am-241 i Rn-222. Promieniowanie α charakteryzuje się wysoką zdolnością jonizacji oraz niską przenikliwością. Do całkowitego pochłonięcia promieniowania α wystarczy nawet kartka papieru. Maksymalny zasięg cząstek α w powietrzu wynosi 10 cm (2).

Promieniowanie β

Strumień elektronów powstający w wyniku rozpadu niektórych pierwiastków promieniotwórczych nazywany jest promieniowaniem β^- . Analogicznie strumień pozytonów (antyelektronów) określany jest jako promieniowanie β^+ . Do pierwiastków emitujących promieniowanie β zalicza się m.in. Sr-90, C-14 i I-131. Charakteryzuje się ono większą przenikliwością niż promieniowanie α . Zasięg promieniowania β zależy od jego energii i w powietrzu wynosi kilka metrów. Jako osłony stosuje się lekkie materiały, takie jak tworzywa sztuczne i aluminium (2).

Promieniowanie X i γ

Oprócz naładowanych cząstek zdolnością jonizacji materii charakteryzuje się również promieniowanie elektromag-

netyczne o odpowiednio wysokiej energii. W zależności od sposobu powstawania wyróżnia się promieniowanie X^1 (inaczej rentgenowskie – RTG) oraz . Promieniowanie rentgenowskie powstaje w wyniku hamowania szybkich elektronów w polu elektrycznym jądra atomowego lub w momencie przeskoku elektronu na bliższą jądra orbitę, więc poza jądrem atomowym. Emisja promieniowania polega na wypromieniowaniu energii wzbudzenia jądra atomu. Jądro może się znajdować w stanie wzbudzone w wyniku rozpadu promieniotwórczego lub reakcji jądrowej (3). Promieniowanie X i charakteryzuje się wysoką przenikliwością. Jako osłony stosuje się ciężkie materiały, takie jak ołów i beton.

Promieniowanie neutronowe

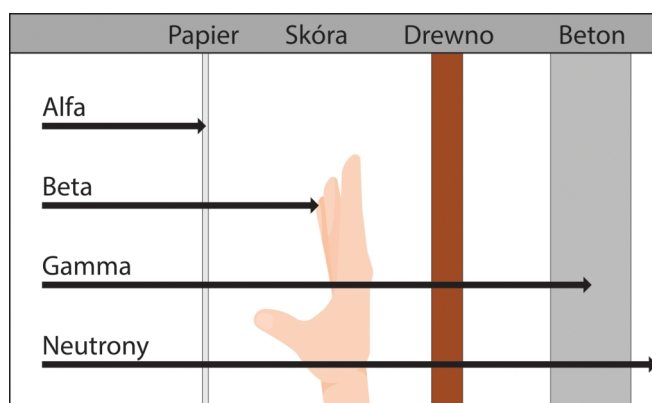
W odróżnieniu od cząstek i neutrony są cząstkami obojętymi elektrycznie. Sposób oddziaływania neutronów z materią znacząco się różni w zależności od ich energii. Zasadniczo do jonizacji ośrodka dochodzi na skutek oddziaływań jądrowych lub zderzeń z jądrami atomów ośrodka. Wysokoenergetyczne neutrony charakteryzują się dużą przenikliwością, dlatego w konstrukcji osłon przed promieniowaniem neutronowym stosuje się warstwę spowalniającą (moderator). Neutrony o niskiej energii są pochłaniane np. przez kadm i bor (2). Zastosowanie osłon ołowianych do osłabiania promieniowania neutronowego powoduje wytworzenie wtórnego promieniowania .

Wielkości fizyczne stosowane w dozymetrii

Wielkości dozymetryczne stosowane w ochronie radiologicznej można podzielić na trzy grupy: **podstawowe**, **ochronne** i **operacyjne**.

Podstawowe, takie jak **fluencja**, **kerma** i **dawka pochłonięta**, odnoszą się bezpośrednio do oddziaływania promieniowania jonizującego z materią. Wielkości te nie są wystarczające do opisu narażenia organizmów żywych. Fluencja jest miarą liczby cząstek przechodzących przez daną powierzchnię. Kerma (*kinetic energy released per mass unit*) oznacza średnią sumę początkowych energii kinetycznych cząstek naładowanych uwolnionych przez padającą cząstkę nienaładowaną (np. foton) na jednostkę masy. Dawka pochłonięta to energia przekazana przez padające promieniowanie na jednostkę masy (5).

Do ustalania limitów narażenia korzysta się z **wielkości ochronnych**, które uwzględniają wpływ rodzaju promieniowania i wrażliwości poszczególnych tkanek i organów na możliwe skutki biologiczne. **Dawka równoważna** jest iloczynem dawki pochłoniętej i współczynnika zależnego od rodzaju promieniowania. Sumę dawek równoważnych



Rys. 1. Zdolność przenikania promieniowania jonizującego przez materiały na podstawie danych Amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego (U. S. NRC) (4).

Fig. 1. Ionizing radiation ability to penetrate materials based on data from the US Nuclear Regulatory Commission (U. S. NRC) (4).

ważonych współczynnikami odpowiednimi dla danego narządu nazywa się **dawką skuteczną**.

Wielkości ochronne nie są jednak możliwe do wyznaczenia przez bezpośredni pomiar, dlatego do realnej oceny narażenia używane są dozymetryczne **wielkości operacyjne**. W kontroli środowiska pracy stosuje się najczęściej **przestrzenny równoważnik dawki $H^*(d)$** , zdefiniowany jako równoważnik dawki, jaki byłby wytworzony w ustandaryzowanej kuli (kuli ICRU) na głębokości d przez odpowiadające pole. Do kontroli narażenia poszczególnych osób stosowany jest **indywidualny równoważnik dawki $H_p(d)$** , odpowiadający równoważnikowi dawki w tkance miękkiej na głębokości d w danym punkcie pod powierzchnią ciała (5).

Do badań jakościowych, na przykład stwierdzania obecności skażenia lub wycieku, stosuje się pomiar liczby impulsów na jednostkę czasu. Najczęściej spotyka się **zliczenia na sekundę** (*counts per second* – cps, równoważnie s^{-1} albo 1/s). Niektóre urządzenia umożliwiają ilościowy pomiar skażeń powierzchniowych w jednostkach aktywności właściwej. **Aktywność** źródła oznacza średnią liczbę rozpadów zachodzących w ciągu sekundy i jest wyrażana w bekerelach (Bq). Wielkość wykorzystywana podczas wzorcowania monitorów skażeń to **powierzchniowa emisja promieniowania (E_s)**. Określa liczbę cząstek emitowanych z powierzchni źródła (albo z jego okienka) w jednostce czasu (6).

W tabeli 1 zestawiono najczęściej spotykane wielkości i ich jednostki. Należy zwrócić uwagę, że przedrostki wskazywane przez przyrząd mogą być inne lub nawet zmieniać się w zależności od zakresu (np. mSv, nSv).

¹ Promieniowanie X zostało tak nazwane w momencie, kiedy Konrad Rentgen jeszcze nie wiedział, z jakim rodzajem promieniowania ma do czynienia. Współcześnie promieniowania o widmie ciągłym powstające w wyniku hamowania elektronów nazywamy promieniowaniem hamowania.

Tabela 1. Wybrane wielkości stosowane w dozymetrii promieniowania jonizującego.**Table 1.** Selected measures used in ionizing radiation dosimetry.

Wielkość	Symbol	Jednostka
Kerma Moc kermy	K K'	μGy $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$
Przestrzenny równoważnik dawki Moc przestrzennego równoważnika dawki	$H^*(d)$ $H'^*(d)$	μSv $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
Indywidualny równoważnik dawki Moc indywidualnego równoważnika dawki	$H_p(d)$ $H'_p(d)$	μSv $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
Powierzchniowa emisja promieniowania	E_s	$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$

Detektory promieniowania jonizującego

Podstawą działania wszystkich detektorów promieniowania jonizującego jest analiza jego oddziaływań z materiałem detektora. Nośnikami informacji są najczęściej wytworzone ładunki, błyski światła lub ślady na kliszy. W zależności od sposobu odczytu można wyróżnić detektory **aktywne**, zwracające informację w czasie rzeczywistym w formie impulsów elektrycznych, oraz **pasywne**, w których wyniki można odczytać po zakończeniu ekspozycji i odpowiedniej obróbce.

Najpopularniejsze typy detektorów **pasywnych** to detektory śladowe, termoluminescencyjne i optoluminescencyjne. Detektory pasywne są tanie, mają zwykle niewielkie rozmiary i **nie wymagają zasilania**. W związku z tym są wygodnym i popularnym narzędziem do długotrwałych pomiarów dawek indywidualnych i środowiskowych. Materiały stosowane w dozymetrii pasywnej charakteryzują się szerokim zakresem pomiarowym, ale wymagają dodatkowej obróbki w celu uzyskania informacji o dawce.

Wśród detektorów **aktywnych** należy wyróżnić detektory gazowe, scyntylacyjne i półprzewodnikowe. W detektorach **gazowych** czynnikiem roboczym jest gaz, który pod wpływem promieniowania ulega jonizacji. Powstałe jony są przyciągane przez elektrody, co prowadzi do powstania impulsu elektrycznego. Do detektorów gazowych zalicza się m.in. **komorę jonizacyjną**, **licznik proporcjonalny** i **licznik Geigera-Müllera**.

W detektorach **scyntylacyjnych** czynnikiem roboczym jest kryształ, który w następstwie pochłaniania promieniowania jonizującego emituje fotony (światło). Fotony są następnie powielane i przekształcane na impulsy elektryczne. W zależności od zastosowanego materiału scyntylacyjnego detektory scyntylacyjne mogą być wykorzystywane do pomiarów cząstek naładowanych (α , β), neutronów oraz spektrum promieniowania.

Działanie detektorów **półprzewodnikowych** wynika z właściwości półprzewodników opisywanych przez pas-

ową teorię przewodnictwa. Detektory półprzewodnikowe znajdują zastosowanie zarówno w małych dozymetrach osobistych, jak i wysokowydajnych spektrometrach o bardzo wysokiej rozdzielczości energetycznej (7).

Ze względu na różnorodność wykorzystywanych rozwiązań dostępne urządzenia dozymetryczne różnią się możliwościami i skutecznością detekcji w zależności od zastosowania. Nie istnieją dozymetry uniwersalne. Stosowane przyrządy dozymetryczne powinny być odpowiednio dobierane do warunków ich użytkowania. Poniżej wymieniono najistotniejsze parametry, które należy wziąć pod uwagę podczas doboru przyrządu.

1. **Zastosowanie** – pomiary środowiskowe, indywidualne lub skażenia powierzchniowe.
2. **Mierzona wielkość** – urządzenia mogą pozwalać na pomiar jednej lub kilku wielkości dozymetrycznych, na przykład kermy i mocy kermy.
3. **Rodzaj mierzonego promieniowania** – α , β , X/ γ , neutronowe. Niektóre urządzenia umożliwiają detekcję kilku rodzajów promieniowania.
4. **Zakres pomiarowy** – zakres mierzonej wielkości, np. 0,01 Sv–1000 Sv.
5. **Zakres energetyczny pomiaru** – zakres energii promieniowania, które urządzenie jest w stanie wykrywać.
6. **Prezentacja wyniku** – wyniki w detektorach aktywnych mogą być prezentowane za pomocą analogowego wskaźnika lub cyfrowego wyświetlacza. Istnieją również **sygnalizatory progowe**, służące wyłącznie do sygnalizowania przekroczenia ustalonej wartości, nie dając dokładnej informacji o chwilowym pomiarze.
7. **Konstrukcja** – sonda wewnętrzna, połączona integralnie z przyrządem pomiarowym, bądź zewnętrzna. Niektóre urządzenia umożliwiają podłączenie kilku rodzajów sond zewnętrznych, różniących się np. typem rejestrowanego promieniowania lub zakresem energetycznym pomiaru. W ten sposób jedno urządzenie może być dostosowane do pracy w różnych warunkach.
8. **Sposób zasilania** – akumulatorowe lub sieciowe.

Na czym polega wzorcowanie?

Nie istnieją idealne urządzenia pomiarowe, które bezbłędnie wskazywałyby rzeczywistą wartość mierzonej wielkości. Łatwo się o tym przekonać, porównując pomiary wykonane w tych samych warunkach za pomocą różnych urządzeń. Dąży się do tego, aby pomiary przeprowadzane niezależnie od siebie za pomocą różnych mierników były spójne i możliwe do porównania. Rozwiązaniem tego problemu jest porównanie wskazań każdego z urządzeń z jednym wspólnym przyrządem stanowiącym odniesienie. Takie działanie nazywa się wzorcowaniem.

Zgodnie z Międzynarodowym słownikiem terminów metrologii prawnej wzorcowanie „to działanie, które w określonych warunkach, w pierwszym kroku ustala zależ-

ność pomiędzy odwzorowywanymi przez wzorzec pomiarowy wartościami wielkości wraz z ich niepewnościami pomiaru a odpowiadającymi im wskazaniami wraz z ich niepewnościami, a w drugim kroku wykorzystuje tę informację do ustalenia zależności pozwalającej uzyskać wynik pomiaru na podstawie wskazania” (8).

Równoważną definicję podaje art. 4 Prawo o miarach, zgodnie z którą wzorcowaniem nazywa się „czynności ustalające relację między wartościami wielkości mierzonej wskazaniami przez przyrząd pomiarowy a odpowiednimi wartościami wielkości fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary” (9).

Wzorcem jednostki miary nazywa się „przyrząd pomiarowy przeznaczony do zdefiniowania, zrealizowania, zachowania lub odtwarzania jednostki miary albo jednej lub wielu wartości danej wielkości fizycznej i służący jako odniesienie” (10). **Wzorzec podstawowy jednostki miary** to wzorzec, którego wartość jest przyjmowana bez odniesienia do innych wzorców tej samej wartości miary (11). Państwowe wzorce jednostek miar w Polsce, utrzymywane przez Główny Urząd Miar, reprezentują najwyższy w kraju poziom dokładności (12). Poprzez odniesienie do wzorców podstawowych tworzone są **wzorce wtórne**, którymi dysponują m.in. akredytowane laboratoria. Podobnie tworzy się wzorce kolejnych niższych rzędów. Istotą wzorcowania przyrządów jest utrzymywanie **spójności pomiarowej**, to znaczy możliwości powiązania wyników pomiarów z odniesieniem poprzez udokumentowany, nieprzerwany łańcuch wzorcowań, z których każde wnosi swój udział do niepewności pomiaru (13).

W praktyce wzorcowanie polega na wykonaniu pomiaru za pomocą wzorcowanego przyrządu i porównaniu jego wskazań z wartością umownie prawdziwą wyznaczoną przez przyrząd wzorcowy (14). Na tej podstawie obliczany jest **współczynnik wzorcowania**, będący ilorazem tych dwóch wartości.

Wzorcowanie w świetle prawa

Zgodnie z art. 27 ustawy Prawo atomowe „przyrządy dozymetryczne stosowane do kontroli i oceny narażenia, niepodlegające obowiązkowi kontroli metrologicznej określonej w przepisach o miarach, powinny posiadać świadectwo wzorcowania” (15). Szczegółowe przepisy dotyczące przyrządów dozymetrycznych, w tym ich wzorcowania, określone są w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 23 grudnia 2002 roku w sprawie wymagań dotyczących sprzętu dozymetrycznego. Dokument zawiera wymagania, jakie muszą spełniać urządzenia wykorzystywane w ochronie radiologicznej. Zgodnie z rozporządzeniem wzorcowanie powinno być wykonane przez akredytowane laboratorium wzorcujące nie rzadziej niż raz na 12 miesięcy. W przypadku posiadania kontrolnego źródła promieniotwórczego ten okres jest wydłużany do 24

miesiący (16). Nadzór nad funkcjonowaniem aparatury dozymetrycznej oraz zapewnienie odpowiedniego wyposażenia należy do obowiązków inspektora ochrony radiologicznej (15). Istnieje możliwość przeprowadzenia wewnętrznego wzorcowania przyrządów tego samego typu poprzez porównanie w jednakowych warunkach wskazań przyrządów niewzorcowanych z tymi uzyskanymi przez przyrząd wzorcowany w akredytowanym laboratorium.

Akredytacja, przyznawana przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA), podnosi wiarygodność wyników, zapewnia wysoką jakość usługi oraz kompetencje personelu. Potwierdza spełnienie międzynarodowych norm i wytycznych. Wzorcowania wykonane w akredytowanym laboratorium są uznawane w krajach będących członkami porozumienia EA-MLA (*European Accreditation Multilateral Agreement* – Europejska Umowa Wzajemnego Uznawania Akredytacji), ILAC-MRA (*International Laboratory Accreditation Cooperation – Mutual Recognition Arrangement* – Międzynarodowa Współpraca w Zakresie Akredytacji Laboratoriów – Umowa o Wzajemnym Uznawaniu), CIPM-MRA (*Comité International des Poids et Mesures – Mutual Recognition Arrangement* – Porozumienie o Wzajemnym Uznawaniu Międzynarodowy Komitet Miar i Wag). O parametrach laboratorium wzorcującego świadczy zdolność pomiarowa CMC (*Calibration and Measurement Capability*). CMC przedstawione w zakresie akredytacji zawiera wielkość mierzoną, w jakiej wzorcuje dane laboratorium, metodę/procedurę wzorcowania, zakres pomiarowy oraz niepewność pomiaru. Aktualne informacje dotyczące zakresu akredytacji laboratoriów wzorcujących można znaleźć na stronie internetowej PCA. W ramach akredytacji laboratoria są zobligowane prowadzić monitorowanie ważności wyników. Polega ona na ciągłej kontroli parametrów wiązki, przy której wzorcowane są przyrządy i wyposażenia pomiarowego oraz analizie jakości wykonywanej pracy.

Dobór parametrów wzorcowania

Wydajność pomiarowa urządzenia dozymetrycznego może znacznie się różnić w zależności od rodzaju i energii promieniowania. Często wynika to z zasady działania samego detektora. Z tego powodu wzorcowanie przeprowadza się w takiej wiązce promieniowania, w jakiej przyrząd jest docelowo użytkowany i tylko w takich warunkach wyznaczone współczynniki kalibracyjne mogą być stosowane.

Określić należy **rodzaj promieniowania** (α , X , γ , neutronowe) i jego **energię** oraz **tryb pomiaru** (pomiar dawki, mocy dawki, skażeń powierzchniowych). Następnie należy skonfrontować te informacje z ofertą laboratorium wzorcującego. W tabeli 8 zestawiono oferty akredytowanych laboratoriów wzorcujących przyrządy dozymetryczne. Jeżeli wzorcowany przyrząd ma pracować ze źródłem, którym laboratorium wzorcujące nie dysponuje, wzorc-

wanie należy przeprowadzić w wiązce promieniowania tego samego typu i możliwie najbliższej energii. W tabeli 2 zawarto przedstawione w normie 4037-1:2021 sugestie wyposażenia laboratoriów wzorcujących. Powyżej wspomniany dokument nie ma zastosowania do wzorcowania przyrządów wykorzystywanych w radiologii diagnostycznej.

Tabela 2. Wykaz preferowanych źródeł promieniowania γ i rentgenowskiego w laboratoriach wzorcujących na podstawie normy 4037-1:2021 (14).

Table 2. List of preferred sources of gamma and X-ray radiation in calibration laboratories based on standard 4037-1:2021 (14).

Rodzaj promieniowania	Źródło/Widmo	Energia/Energia średnia (keV)
	Cs-137	662
	Co-60	1250
X	N-40	33,3
	N-60	47,9
	N-80	65,2
	N-100	83,3
	N-120	100
	N-150	118
	N-200	165
	N-250	207
	N-300	248
	N-350	288
	N-400	328

Tabela 3. Wykaz preferowanych źródeł powierzchniowych emitujących promieniowanie α w laboratoriach wzorcujących na podstawie normy 8769:2020 (17).

Table 3. List of preferred α -emitting surface sources in calibration laboratories based on 8769:2020 (17).

Rodzaj promieniowania	Źródło	Energia maksymalna (keV)
	C-14	156
	Tc-99	294
	Cl-36	710
	Sr-90/Y-90	546(Sr) 2280(Y)
	Ru-106/Rh-106	39(Ru) 3546(Rh)

Tabela 4. Wykaz preferowanych źródeł powierzchniowych emitujących promieniowanie β w laboratoriach wzorcujących na podstawie normy 8769:2020 (17).

Table 4. List of preferred β -emitting surface sources in calibration laboratories based on 8769:2020 (17).

Rodzaj promieniowania	Źródło	Energia (keV)
	Am-241	5544
	Th-230	4688

Tabela 5. Wykaz preferowanych źródeł promieniowania neutronowego w laboratoriach wzorcujących na podstawie normy 8529-1:2021 (18).

Table 5. List of preferred neutron radiation sources in calibration laboratories based on 8529-1:2021 (18).

Rodzaj promieniowania	Źródło	Energia (MeV)
neutronowe	Cf-252 (moderowany D ₂ O)	0,57
	Cf-252	2,13
	Am-241-Be „mały”*	4,17
	Am-241-Be „duży”*	4,05

* w zależności od aktywności Am-241.

Moc dawki – liniowość i charakterystyka energetyczna

Wzorcowanie w trybie mocy dawki przeprowadza się w **całym zakresie pracy** przyrządu. W przypadku przyrządów analogowych pomiary wykonuje się w każdym zakresie pomiarowym, natomiast w przypadku przyrządów cyfrowych zakres działania dzieli się na dekady. Ten sposób pomiaru pozwala stwierdzić, czy przyrząd w całym zakresie pracy działa i reaguje na promieniowanie podobnie. Jeżeli urządzenie działa prawidłowo, zależność wartości odniesienia od wartości zmierzonej przedstawiona w formie graficznej jest funkcją liniową, dlatego cały proces potocznie nazywa się **liniowością**.

W przypadku, gdy ten sam przyrząd ma służyć do pomiarów promieniowania α lub X o różnej energii, nie trzeba wykonywać kilkakrotnie pomiarów w całym zakresie działania przyrządu. Zamiast tego możliwe jest wyznaczenie **charakterystyki energetycznej** – sprawdzenie, jak zmienia się odpowiedź detektora w zależności od energii promieniowania. Dla każdej energii wykonywany jest pomiar w jednym punkcie. Wynik takiego pomiaru odnosi się do wyniku otrzymanego przy wyznaczeniu liniowości. Na tej podstawie wyznaczany jest współczynnik kalibracji energetycznej, przez który należy przemnożyć funkcję liniową. Szczegóły dotyczące wyznaczania wartości poprawnej w zależności od energii przedstawiono w dalszej części pracy.

Podczas wzorcowania pożądane wartości osiąga się przez dobór odległości od źródła, grubości osłon oraz aktywności (w przypadku źródeł α) lub natężenia prądu (w przypadku lampy RTG). Wartości odniesienia są wyznaczane na podstawie przeprowadzanych okresowo pomiarów lub jednoczesnego pomiaru przyrządem wzorcowym.

Dawka

Wzorcowanie w trybie dawki odbywa się przez ustawienie przyrządu w warunkach odpowiadających znanej wartości mocy dawki i wyznaczenie czasu ekspozycji potrzebnego

do osiągnięcia wybranej wartości wzorcowej dawki. Należy podkreślić, że urządzenia wykorzystywane do pomiaru dawek muszą być wzorcowane w trybie pomiaru dawki. Wzorcowanie w trybie pomiaru mocy dawki nie może być traktowane jako zamiennik.

Skażenia powierzchniowe

W trybie pomiaru skażeń miernik jest ustawiany w możliwie najmniejszej odległości od referencyjnego źródła powierzchniowego, a otrzymane wyniki wyrażane są zazwyczaj w jednostkach cps. Otrzymany współczynnik wzorcowania w tym przypadku nie jest bezwymiarowy. Pozwala on przeliczyć wskazania przyrządu na powierzchniową emisję promieniowania.

Od zlecenia do faktury

Na początku należy ustalić zakres, w jakim przyrząd ma być wzorcowany. Na prośbę klienta laboratorium wzorcujące wystawia ofertę, w której zawarta jest cena wzorcowania. Koszt usługi zależy od rodzaju przyrządu i wybranego zakresu wzorcowania.

Kolejnym krokiem jest uzupełnienie zlecenia. Na stronach wielu laboratoriów wzorcujących znajdują się gotowe formularze. Zlecenie wzorcowania zawiera:

1. Datę zlecenia.
2. Dane firmy – nazwę, adres, NIP.
3. Nazwę i numer seryjny przyrządu.
4. Numer oferty, zamówienia lub umowy – jeśli dotyczy.
5. Dane kontaktowe do przedstawiciela z ramienia zlecającego.
6. Jednoznacznie określony zakres wzorcowania.
7. Adres do wysyłki przyrządu i dokumentów.

Wskazanie osoby zajmującej się sprawą ułatwia późniejszy kontakt w przypadku ewentualnego braku informacji lub potrzeby wyjaśnienia nieścisłości. Następnie należy dostarczyć urządzenie wraz ze zleceniem do laboratorium wzorcującego.

Po zakończeniu usługi jest wystawiana faktura, a przyrząd zostaje odesłany do klienta. Coraz częściej w ofercie laboratoriów wzorcujących jest możliwość otrzymania dokumentów w formie elektronicznej.

Jak korzystać ze świadectwa wzorcowania

W laboratoriach posiadających akredytację świadectwa wzorcowania są tworzone zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN ISO/IEC 17025:2018. Dokument zawiera datę wydania oraz numer identyfikacyjny, informacje dotyczące przyrządu, tj. numer seryjny oraz producenta, procedurę wzorcowania, według której zostało wykonane wzorcowanie oraz warunki atmosferyczne podczas pomiarów.

Dalej zamieszczona jest informacja o wiązce i energii promieniowania wykorzystanej do wzorcowania oraz o mierzonej wielkości. Świadectwo zawiera również informację o geometrii pomiaru. Kąt padania promieniowania może mieć znaczący wpływ na wskazania przyrządu, dlatego, korzystając z przyrządu, należy brać to pod uwagę.

W tabeli 6 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów liniowości dla przyrządu cyfrowego o zakresie działania do 10 mSv/h.

Pierwsza kolumna przedstawia zakresy pomiarowe. Dalej przedstawiona jest wartość odniesienia, w której eksponowano detektor i wskazania wzorcowanego przyrządu. Ostatnia kolumna zawiera współczynnik wzorcowania wyznaczony na podstawie danych przedstawionych w poprzednich kolumnach. Jest to współczynnik, przez który

Tabela 6. Przykładowe wyniki pomiarów dla przyrządu cyfrowego wzorcowanego w mocy przestrzennego równoważnika dawki w wiązce Cs-137.

Table 6. Example of measurement results for a digital instrument calibrated in the ambient dose rate equivalent in the Cs-137 beam.

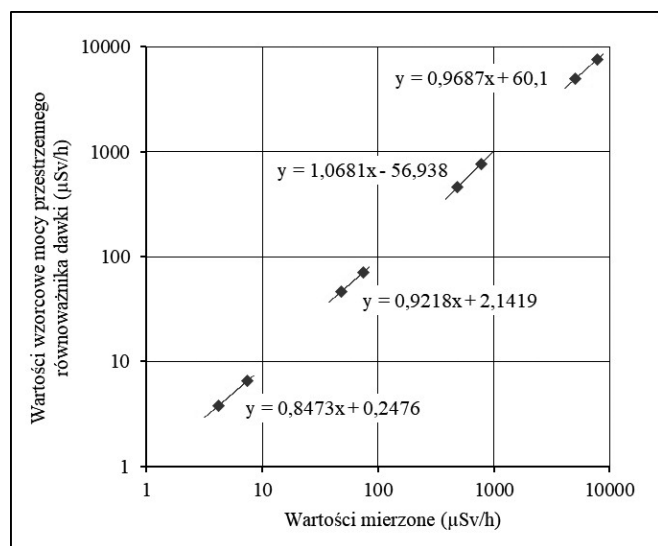
Dekada	Wartość odniesienia W	Wskazanie wzorcowanego przyrządu M	Współczynnik wzorcowania $K_z = \frac{W}{M}$	\pm	Niepewność rozszerzona U(K _z)
	Sv/h				
10	3,8	4,2	0,91	\pm	0,15
	6,5	7,4	0,881	\pm	0,118
100	46,2	47,8	0,967	\pm	0,090
	70,5	74,1	0,951	\pm	0,072
1000	461	485	0,951	\pm	0,066
	766	770	0,994	\pm	0,069
10 000	4975	5074	0,981	\pm	0,065
	7569	7752	0,976	\pm	0,065

należy pomnożyć wskazanie przyrządu dozymetrycznego. Można to przedstawić wzorem:

$$W_p = M \cdot K_z$$

gdzie: W_p – wartość poprawna, M – wartość mierzona, K_z – współczynnik wzorcowania.

Taki sam sposób postępowania stosuje się przy wzorcowaniu w trybie dawki i pomiaru skażeń powierzchniowych. Graficzną interpretację wyników przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wyniki pomiarów z tabeli 6 przedstawione w formie graficznej.
Fig. 2. Measurement results from Table 6 presented in graphical form.

Podczas korzystania z graficznej wersji należy wartość wskazaną przez przyrząd podczas pomiaru wstawić za „x” do odpowiedniego równania z wykresu. „y” odpowiada wartości poprawnej.

W przypadku pomiarów charakterystyki energetycznej oprócz współczynnika wzorcowania należy wziąć pod uwagę współczynnik kalibracji energetycznej. W tabeli 7

Tabela 7. Przykładowa tabela przedstawiająca współczynniki charakterystyki energetycznej.

Table 7. Example table showing energy response factors.

Rodzaj widma	Energia keV	K_E	\pm	$U(K_E)$
Cs-137	662	0,86	\pm	0,14
Co-60	1250	0,77	\pm	0,14
N-40	33	1,34	\pm	0,20
N-60	48	1,08	\pm	0,18
N-80	65	1,00	\pm	0,17
N-100	83	0,87	\pm	0,16
N-120	100	0,87	\pm	0,16
N-150	118	0,79	\pm	0,15
N-200	164	0,76	\pm	0,15

zamieszono przykładowe współczynniki charakterystyki energetycznej.

W przypadku przedstawionym w tabeli 7 liniowość została wykonana dla widma N-80 w polu promieniowania X. Patrząc na współczynniki K_E , można zauważyć, jaki wpływ na wskazywany przez detektor wynik ma energia promieniowania. Aby wyznaczyć wartość poprawną, należy wartość zmierzona pomnożyć przez odpowiedni współczynnik wzorcowania z pomiarów liniowości i dodatkowo pomnożyć przez współczynnik kalibracji energetycznej wyznaczony dla odpowiedniego widma, co przedstawiono we wzorze:

$$W_p = M \cdot K_z \cdot K_E$$

gdzie: W_p – wartość poprawna, M – wartość mierzona, K_z – współczynnik wzorcowania, K_E – współczynnik kalibracji energetycznej.

Podsumowanie

Wzorcowanie przyrządów dozymetrycznych stanowi kluczowy element ochrony radiologicznej zarówno pracowników, jak i osób z ogółu ludności. Niewłaściwy dobór urządzenia pomiarowego może skutkować brakiem odpowiedzi przyrządu pomimo istnienia rzeczywistego zagrożenia. Przyrządy dozymetryczne charakteryzują się różną odpowiedzią w zależności od energii padającego promieniowania, co może istotnie wpływać na wyniki, prowadząc zarówno do niedoszacowania, jak i przeszacowania wyznaczonej wielkości. Brak odpowiedniego wzorcowania przyrządów dozymetrycznych pozostawia nas w niepewności co do rzeczywistej wartości zmierzonej dawki promieniowania.

Notki o autorach

Alicja Jakubowska – mgr fizyki medycznej, absolwentka Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Kierownik ds. technicznych w Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Kamila Kempny – inżynier, absolwentka Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Pracownik Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Zuzanna Pawłowska – mgr inż. inżynierii biomedycznej, absolwentka Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Kierownik ds. technicznych w Pracowni Dawek Indywidualnych i Środowiskowych, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Literatura

1. Raport Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki za 2021 r. Warszawa 2021.
2. Gostkowska B. *Ochrona radiologiczna. Wielkości, jednostki i obliczenia*, CLOR, Warszawa 2016.
3. Żarnowiecki K. *Podstawy Ochrony Radiologicznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1963.

Tabela 8. Zestawienie źródeł oferowanych przez akredytowane laboratoria wzorujące w dziedzinach 18.01-18.04 w Polsce. Dane na dzień 03.10.2023.
Table 8. Summary of sources offered by accredited calibration laboratories in the fields 18.01-18.04 in Poland. Data as of 03.10.2023.

Nr akredytacji	Nazwa Instytutu	Gamma, RTG					Beta					Neutrony					Skażenia			
		Cs ¹³⁷	Co ⁶⁰	Ir ¹⁹²	Am ²⁴¹	RTG	Sr-90	Kr-85	Am/Be	Pu-Be	C ¹⁴ ()	C ¹³⁶ ()	Sr ⁹⁰ /Y ⁹⁰ ()	Pu ²³⁹ ()	Am ²⁴¹ ()	inne				
AP 029	Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk	X								X	X	X	X		X					
AP 057	Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej	X	X		X	N40-N250	X	X		X	X	X		X						
AP 070	Narodowe Centrum Badań Jądrowych	X	X		X				X	X	X	X		X						
AP 073	Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii	X	X			N40-N300														
AP 075	Instytut Medycyny Pracy im. prof. dra med. J. Nofera w Łodzi					23-35 kV 40-120 kV*														
AP 109	POLON-ALFA S.A.	X	X																	
AP 120	Narodowe Centrum Badań Jądrowych Ośrodek Radioizotopów POLATOM, Laboratorium Wzorców Radioaktywności									X	X	X	X	X	Co ⁵⁷ Co ⁶⁰ Tl ²⁰⁴ Pm ¹⁴⁷					
AP 155	Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie – Państwowy Instytut Badawczy		X				X													
AP 175	Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii	X								X	X	X		X						

* zastosowania medyczne.

4. <https://www.nrc.gov/images/about-nrc/radiation/penetrating-power-rad.gif>. [Online]
5. Brodecki M., Domienik J., Zmyślony M. *System wielkości dozymetrycznych do oceny poziomu dawek otrzymywanych przez personel zawodowo narażony na zewnętrzne źródła promieniowania jonizującego*, Medycyna Pracy, 63, 2012, Tom 5, s. 607–617.
6. PN-ISO 8769:2005, 2005, *Wzorcowe źródła do kalibracji monitorów skażeń powierzchni – Część 2: Elektryony o energii poniżej 0,15 MeV i fotony o energii poniżej 1,5 MeV*.
7. Knoll Glenn F. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2010.
8. Borzymiński J. *Międzynarodowy słownik terminów metrologii prawnej*, Główny Urząd Miar, Warszawa 2015.
9. Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. Prawo o miarach (Dz.U. z 2022 poz. 2063).
10. Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. Prawo o miarach (Dz.U. 2001 nr 63 poz. 636).
11. Dusza J. *Podstawy pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019. ISBN 978-83-7814-958-3.
12. Główny Urząd Miar. *Wzorce państwowe*. [Online] [Zacytowano: 02 10 2023.] <https://www.gum.gov.pl/pl/o-nas/wzorce-panstwowe/2547,Wzorce-panstwowe.html>.
13. ISO/IEC Guide 99, 2010, *Międzynarodowy słownik metrologii – Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM)*.
14. ISO 4037-1:2021-07, 2021, *Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods*.
15. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2023 poz. 1173).
16. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 23 grudnia 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących sprzętu dozymetrycznego (Dz.U. 2002 nr 239 poz. 2032).
17. ISO 8769:2020, 2020, *Measurement of radioactivity — Alpha-, beta- and photon emitting radionuclides — Reference measurement standard specifications for the calibration of surface contamination monitors*.
18. ISO 8529-1:2021, 2021, *Neutron reference radiations fields — Part 1: Characteristics and methods of production*.

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. Nowy Świat 6/12,

00-400 Warszawa, Polska

E-mail: 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. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa
www.gov.pl/web/paa