

**INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY**



**„Monitoring promieniowania jonizującego realizowany
w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska
w latach 2022 – 2025.**

***Zadanie 1: Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego
wykrywania skażeń promieniotwórczych”***

**ETAP III
RAPORT PRZEDSTAWIAJĄCY WYNIKI i ANALIZY
ZA ROK 2023**



Sfinansowano ze środków
**NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ**

*Praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska
na podstawie umowy nr GIOŚ/234/2022/DMS/NFOŚ z dnia 10.10.2022 r., finansowana
ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej*

Autorzy:
mgr Paweł Miszczuk
mgr inż. Barbara Rohm
mgr Julita Biszczuk-Jakubowska
dr Michał Saniewski
dr hab. inż. Tamara Zalewska, prof. IMGW-PIB

Sprawdził i zatwierdził
Kierownik
Wydziału Monitorowania Jakości Powietrza

mgr Julita Biszczuk-Jakubowska

WARSZAWA 2024

Spis treści

1. Cel i zakres pracy
2. Metodyka badań prowadzonych na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych
 - 2.1. Pobór i przygotowanie próbek
 - 2.2. Metody pomiarowe wraz z opisem systemu zapewnienia jakości pomiarów
3. Wyniki i omówienie wyników z 2023 roku oraz w odniesieniu do okresu 2000-2022
 - 3.1. Moc dawki promieniowania gamma w powietrzu
 - 3.2. Radioaktywność próbek aerozoli w powietrzu
 - 3.2.1 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego emitujących promieniowanie alfa
 - 3.2.2 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa
 - 3.2.3 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta
 - 3.3. Globalna aktywność beta całkowitego opadu atmosferycznego
 - 3.3.1 Globalna aktywność beta całkowitego opadu dobowego
 - 3.3.2 Globalna aktywność beta wody opadowej
 - 3.3.3 Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego
 - 3.4. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{134}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego
 - 3.5. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego
 - 3.6. Stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych: ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac , ^{40}K w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego
4. Podsumowanie
5. Wnioski

1. Cel i zakres pracy

Pomiary radioaktywności w atmosferze prowadzone przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB) stanowią realizację programu Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2020-2025¹.

Państwowy Monitoring Środowiska jest systemem pomiarów, ocen i prognoz stanu środowiska oraz gromadzenia, przetwarzania i rozpowszechniania informacji o stanie środowiska. Program został opracowany w Departamencie Monitoringu Środowiska Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (DMŚ GIOŚ). Raporty roczne z analizą wyników publikowane są na stronie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska².

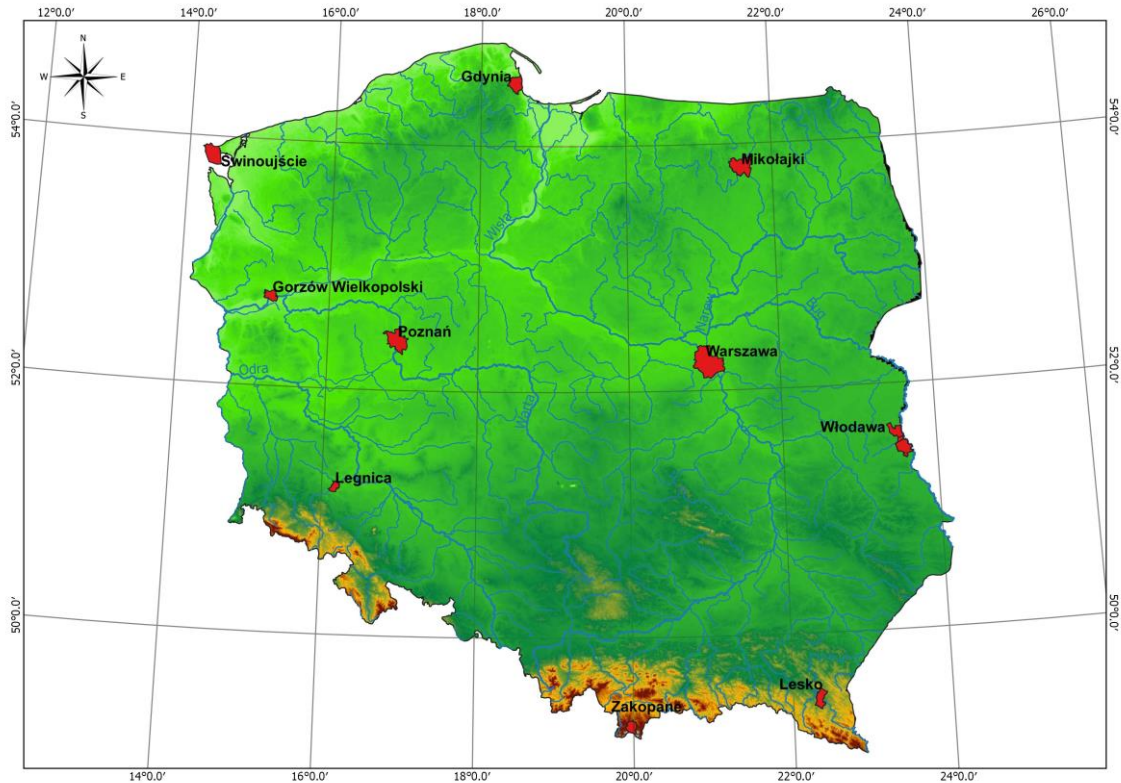
Dnia 10 października 2022 roku została podpisana umowa nr GIOŚ/234/2022/DMŚ/NFOŚ między IMGW-PIB a GIOŚ na wykonanie pracy pt.: „**Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska w latach 2022 – 2025. Zadanie 1: Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych**”. W ramach tej umowy IMGW-PIB zobowiązany jest do wykonywania pomiarów w okresie od 1 października 2022 roku do 30 września 2025 roku, jak również do przedstawiania uzyskanych wyników w postaci zestawień oraz raportów rocznych.

Niniejszy raport prezentuje wyniki pomiarów prowadzonych od 1 stycznia 2023 do 31 grudnia 2023 r., **wykonanych w ramach umowy GIOŚ/234/2022/DMŚ/NFOŚ z dnia 10.10.2022 r. „Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska w latach 2022 – 2025. Zadanie 1: Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych”**.

Stacje IMGW-PIB prowadzące pomiary zlokalizowane są w Warszawie, Gdyni, Włodawie, Świnoujściu, Gorzowie Wlkp., Poznaniu, Lesku, Zakopanem, Legnicy i Mikołajkach (Rys. 1), przy czym stacje Gorzów Wlkp. oraz Poznań traktowane są jako jedna stacja ze względu na to, że prowadzą pomiary uzupełniające.

¹ https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/pms/PPMS_2020-2025_OSTATECZNY.pdf

² <https://www.gov.pl/web/gios/wykonywanie-pomiarow-na-stacjach-wczesnego-wykrywania-skazen-promieniotworczych-imgw-pib>



Rys. 1. Lokalizacja stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych IMGW – PIB

Zakres prac pomiarowych:

- Ciągły pomiar mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu na wysokości 1 m nad powierzchnią gruntu z rejestracją wartości średnich godzinowych i średnich dobowych na 9 stacjach pomiarowych sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych (w Warszawie, Gdyni, Włodawie, Świnoujściu, Gorzowie Wlkp., Lesku, Zakopanem, Legnicy i Mikołajkach).
- Ciągły pomiar radioaktywności próbek aerozoli powietrza na 7 stacjach sieci (we Włodawie, Świnoujściu, Gorzowie Wlkp., Lesku, Zakopanem, Legnicy i Mikołajkach) z rejestracją średnich godzinowych i średnich dobowych wartości aktywności promieniotwórczej emiterów promieniowania alfa i beta oraz wyznaczanej aktywności sztucznych emiterów beta promieniotwórczych.
- Pomiary globalnej aktywności beta próbek dobowego opadu całkowitego oraz próbek miesięcznego opadu całkowitego na 9 stacjach pomiarowych (w Warszawie, Gdyni, Włodawie, Świnoujściu, Poznaniu, Lesku, Zakopanem, Legnicy i Mikołajkach).
- Spektrometryczne pomiary aktywności ^{137}Cs i wybranych naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego.
- Radiochemiczne oznaczanie ^{90}Sr w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono wyniki uzyskane w roku 2023 wraz z komentarzem uwzględniającym dane z lat poprzednich. Wyniki przedstawiono w postaci tabelarycznej i graficznej.

2. Metodyka badań prowadzonych na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych

2.1. Pobór i przygotowanie próbek

Zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 17 grudnia 2002 r. (Dz. U. Nr 239 poz. 2030) oraz zgodnie z zakresem umowy z GIOŚ pobór próbek prowadzony na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych IMGW-PIB: 001 – Warszawa, 002 – Gdynia, 004 – Mikołajki, 006 – Poznań (pomiar opadu całkowitego), 006 – Gorzów Wlkp. 007 – Świnoujście, 008 – Legnica, 151 – Włodawa, 165 – Zakopane, 166 – Lesko obejmuje:

- a) Pobór próbek całkowitego opadu dobowego polegający na zbieraniu opadu (mokrego i suchego) do kuwety o powierzchni 1500 cm² napełnionej warstwą wody o grubości 1 cm eksponowanej przez okres 24 godzin, od godziny 6 UTC. Po zakończeniu ekspozycji próbki odparowuje się w parownicy wyłożonej bibułą filtracyjną tak, aby zanieczyszczenia znajdujące się w wodzie po jej odparowaniu osadziły się na bibule. Bibułę spopiela się następnie w piecu muflowym w temperaturze 450°C. Otrzymany popiół przenosi się do aluminiowej miseczki pomiarowej. Wymiary miseczki pomiarowej: średnica wewnętrzna – 25 mm, głębokość – 4 mm. Gęstość powierzchniowa warstwy popiołu w miseczce pomiarowej nie powinna przekraczać 50 mg cm⁻³, co pozwala na zaniedbanie samoabsorpcji.
- b) Pobór próbek całkowitego opadu miesięcznego polegający na zbieraniu opadu (mokrego i suchego) do trzech kuwet o łącznej powierzchni 4500 cm² eksponowanych przez okres jednego miesiąca od każdego pierwszego dnia danego miesiąca. Przyjęto, że próbce opadu całkowitego przypisuje się datę dnia, w którym rozpoczęto jej ekspozycję. Po zakończeniu ekspozycji próbki, zebraną wodę odparowuje się w parownicy wyłożonej bibułą filtracyjną tak, aby zanieczyszczenia znajdujące się w wodzie po jej odparowaniu osadziły się na bibule. Bibułę spopiela się następnie w piecu muflowym w temperaturze 450°C. Otrzymany popiół przenosi się do aluminiowej miseczki pomiarowej. Wymiary miseczki pomiarowej: średnica wewnętrzna – 25 mm, głębokość – 4 mm. Gęstość powierzchniowa warstwy popiołu w miseczce pomiarowej nie powinna przekraczać 50 mg cm⁻³, co pozwala na zaniedbanie samoabsorpcji.
- c) Pobór próbek aerozoli powietrza odbywający się poprzez wymuszony przepływ powietrza przez odpowiednie filtry w cyklach półgodzicznych. Probki w takiej postaci poddawane są pomiarom.

2.2. Metody pomiarowe wraz z opisem systemu zapewniania jakości pomiarów

Pomiar mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu – Sonda TDSG

Sonda TDSG służy do ciągłego pomiaru mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu oraz rozróżniania mocy dawki pochodzącej od izotopów naturalnych i sztucznych poprzez pomiar spektrometryczny promieniowania gamma.

Sonda TDSG, zainstalowana jest ok. 1 metr nad powierzchnią ziemi i dokonuje równoczesnego i niezależnego pomiaru:

- równoważnika mocy dawki H*(10) opartego o czuły detektor Geigera–Mullera (GM),
- spektrum promieniowania gamma w powietrzu przy pomocy toru spektrometrycznego opartego o detektor scyntylicyjny ze scyntylatorem NaI(Tl).

Sonda TDSG, poprzez pojedynczy kabel, jest zasilana i współpracuje z komputerem po łączu RS-485. Sterowanie oraz wizualizacja i archiwizacja wyników pomiarowych odbywa się z poziomu komputera poprzez zainstalowane specjalistyczne oprogramowanie TDSG.

We wspólnej obudowie sondy TDSG, zainstalowane są następujące główne zespoły pomiarowe:

1. Tor do pomiaru równoważnika mocy dawki $H^*(10)$ z czułym licznikiem Geigera-Mullera wraz z układami elektronicznymi (HV, wzmacniacze, układ przeliczający impulsy na moc dawki w nSv/h) o podstawowych parametrach:
 - a. czułość około 800-900 imp/min/ μ Sv/h,
 - b. pomiar równoważnika mocy dawki $H^*(10)$ w nSv/h,
 - c. zakres pomiarowy 0,01 – 3000 μ Sv/h,
 - d. charakterystyka energetyczna skompensowana do pomiaru równoważnika mocy dawki $H^*(10)$ w zakresie 35 keV do 1,3 MeV,
2. Tor spektrometryczny ze scyntybłokiem wraz z układami elektronicznymi (HV, dzielnik HV, przedwzmacniacz ładunkowy, wzmacniacz spektrometryczny,
3. Układ i czujniki do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza,
4. Układ zegara i kalendarza z podtrzymaniem baterijnym,
5. Układ archiwizujący wszystkie dane pomiarowe za okres ostatnich czterech miesięcy, oparty o przemysłową kartę NAND Flash SLC microSD.

W sondzie TDSG zastosowano następujące detektory wartości fizycznych:

1. Licznik GM do pomiaru mocy dawki promieniowania gamma,
2. Scyntybłok (fotopowielacz ze scyntylatorem NaI(Tl)) do pomiaru spektrum promieniowania gamma,
3. Termometr do pomiaru wewnętrznej temperatury w sondzie,
4. Czujnik wilgotności wewnątrz sondy.

W ramach współpracy z firmą TD-ELECTRONICS Tomasz Dudek w przypadku zauważonych nieprawidłowości w pracy sond TDSG, sondy są na bieżąco diagnozowane i w razie potrzeby naprawiane. W 2023 roku nie była konieczna żadna naprawa sond.

Rejestracja danych pomiarowych

Specjalistyczne oprogramowanie komputera w języku polskim, sterujące i współpracujące z sondą TDSG, o następujących funkcjach:

1. Zadawanie parametrów pracy (HV, wzmocnienia zgrubnego i precyzyjnego, parametrów układu stabilizacji widma, czasu pojedynczego pomiaru, współczynników kalibracyjnych),
2. Zapis i odczyt danych pomiarowych (bieżących i archiwalnych) – mocy dawki, spektrum, czasu pomiaru, ilości impulsów, temperatury, wilgotności,
3. Prezentacja na monitorze komputera danych pomiarowych (bieżących i archiwalnych) w postaci cyfrowej i wykresów,
4. Analiza danych pomiarowych w oparciu o zadane algorytmy w celu wykrycia obecności w powietrzu i rozróżnienia sztucznych i naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych, odpowiedzialnych za wzrost mocy dawki,
5. Algorytm rozpoznawania izotopów w sposób ręczny lub automatyczny,
6. Zapis wszystkich danych pomiarowych bieżących i archiwalnych do plików tekstowych i XML,
7. Współpraca oprogramowania z sondą TDSG z komputera lokalnego (przez port szeregowy, jak i LAN) oraz z komputerów zdalnych (przez intranet),
8. Przeprowadzanie wstępnej autokalibracji,

9. Autodiagnostyka prawidłowości pracy i zbieranych wyników pomiarowych,
10. Tworzenie raportów zawierających wyniki pomiarów oraz wykresy (w formacie txt oraz PDF) za dowolny okres,
11. Funkcja statystyki danych pomiarowych tj. określanie wyników każdego pomiaru w postaci średnich godzinnych oraz średnich, maksymalnych i minimalnych za dobę oraz inny dowolny okres, obliczanie odchylenia standardowego dla dowolnej serii danych pomiarowych i zapis obliczeń w plikach txt oraz możliwość dołączenia ich do raportu.

Pomiar radioaktywności próbek aerozoli powietrza – Zestaw Berthold LB9128.

Monitor Berthold LB9128 z filtrem taśmowym posiada następujące cechy:

- Przesuw filtra może być ciągły lub skokowy. Taśma filtracyjna prowadzona jest w obszarze gromadzenia pyłów na cylindrycznych łożyskach, przez który przepływa powietrze. Zapewnia to równomierne gromadzenie pyłu przy ciągłym i jednostajnym przesuwie filtra, bez ryzyka zerwania taśmy filtracyjnej.
- Szybki detektor Alfa/Beta umieszczony jest bezpośrednio nad powierzchnią gromadzącą pył i mierzy radioaktywność cząsteczek pyłu.
- Zespół gromadzenia pyłu i detektor ekranowane są osłoną ołowową w kącie 4π . Daje to w wyniku małe tło własne i niską czułość na promieniowanie otoczenia. Gdyby to nie wystarczało dla zastosowań we fluktuacyjnych polach gamma, opcjonalnie może zostać zamontowany detektor gamma dla kompensacji ich wpływu.
- Duża powierzchnia gromadzenia pyłów pozwala na prędkość przepływu $> 20 \text{ m}^3/\text{godz.}$, stąd niskie progi detekcji.
- Jeżeli to konieczne, automatyczne rozszerzenie zakresu pomiarowego może być uzyskiwane przez zastosowanie szybkiego przesuwu taśmy filtra.
- Przy pomiarze Alfa-Beta, wpływ naturalnej radioaktywności kompensowany jest metodą stosunku Alfa/Beta lub opcjonalnie metodą połączenia pseudo koincydencji alfa-beta (ABPD) z dyskryminacją energii cząstek alfa (spektroskopia AED).
- Do rejestracji danych i ich oceny użyty jest wielokanałowy rejestrator typu LB9000 połączony z komputerowym rejestratorem danych typu PC.

Monitor LB 9128-MAXI składa się z następujących bloków:

- Zespół gromadzenia pyłów LB 9128-MAXI. Zespół ten pozwala na zainstalowanie szybkiego pomiaru Alfa-Beta oraz szybkiego pomiaru Gamma. Detektor Beta lub Alfa-Beta zamontowany jest u góry obszaru gromadzenia pyłu, co zapewnia pomiar w czasie gromadzenia aktywności.
- Detektor Beta lub odpowiednio Alfa/Beta mierzy bezpośrednio na powierzchni gromadzenia pyłu, aby nie występowało żadne opóźnienie oceny. Próbkowane powietrze jest wciągane przez płaską dyszę z filtrem z włókna szklanego.
- Cząstki Alfa/Beta mierzone są w czasie rzeczywistym za pomocą diody krzemowej (Si-diode CAM-PIPS) o powierzchni 1700 mm^2 . Zarówno dla sygnałów Beta, jak i Alfa dostępna jest kompensacja wpływu produktów rozpadu radonu metodą pseudo koincydencji. Oddzielny próg wysokiej energii cząstek Alfa (nastawiany w zakresie od 6 do 10 MeV) może być używany do oddzielnej oceny zawartości toronu (produkt rozpadu Rn-220) w powietrzu, na podstawie rozpadu Po-212 ($E_\alpha 8,78 \text{ MeV}$), względnie do poprawiania metody ABPD z dyskryminacją energii Alfa, poprzez wybór progu dyskryminacji Alfa powyżej 6 MeV.
- Kasetka ze stali nierdzewnej o stopniu zabezpieczenia przed wodą IP68 oraz przednie drzwiczki

z przezroczystego pleksiglasu otaczają części narażone na wilgoć. Z tylnej strony kasety zamontowany jest mechanizm napędowy i czujniki taśmy filtracyjnej. Mechanizm napędowy zapewnia przesuw filtru przy małym naprężeniu i czyni go mniej wrażliwym na zerwanie, nawet w przypadku wilgotnej taśmy filtracyjnej. Kasetka wykonana jest w standardzie 19" i przystosowana do zamontowania w obudowie 19". Przednie drzwiczki zabezpieczone są 5 zamknięciami śrubowymi i opcjonalnym czujnikiem "Otwarte drzwiczki".

- Zespół napędowy PLC i mechanizm przesuwu filtru z silnikiem krokowym. Zespół pompy, wyposażony w niewymagającą konserwacji pompę z boczną dmuchawą, przystosowany do temperatury maksymalnej 45°C i przeznaczony do wytwarzania przepływu próbki, wynoszącego 8 m³/godz., wyposażony w czujnik przepływu lub opcjonalnie w przepływomierz (o zasadzie pomiaru typu Vortex lub kalorymetrycznej).
- Elektronika oceny pomiaru oparta jest na rejestratorze LB 9000. Sercem rejestratora jest komputer PC z systemem operacyjnym Windows XP. Detektory i czujniki firmy Berthold łączą się z komputerem przez interfejsy, oparte na inteligentnych modułach peryferyjnych i komunikują się z panelem PC przy użyciu szyny danych CAN. W tej koncepcji elementy detektora Gamma komunikują się przy użyciu jednego z interfejsów USB komputera PC. Możliwości wielozadaniowości, właściwe systemowi Windows XP, pozwalają na jednoczesne uruchomienie 2 programów (LB9000 - GammaVision).

Kompensacja produktów rozpadu radonu

Aby móc wykrywać najniższe poziomy sztucznej radioaktywności w obecności naturalnego promieniowania (produkty rozpadu radonu lub toronu), które mogą wahać się od 1 do kilkuset Bq/m³, zależnie od miejsca, pory roku, pory dnia lub nocy, warunków pogodowych - wymagana jest pełna dyskryminacja naturalnej aktywności. W monitorze cząstek Beta może być to uzyskane przy użyciu kompensacji metodą stosunku Beta/Alfa, a w monitorze Alfa/Beta metodą kompensacji ABPD.

Kompensacja metodą stosunku Beta/Alfa

Ta metoda kompensacji polega na założeniu, że aktywność Alfa jest wynikiem naturalnie występujących izotopów. Promieniowanie Beta wskazywane jest jako aktywność sztuczna netto, poprzez korekcję aktywności brutto, pod kątem składowej naturalnego promieniowania, przy użyciu wzoru: Aktywność sztuczna Beta netto = $K_b * (B - aA)$, gdzie: A i B - częstości zliczeń w kanałach Alfa i Beta, po korekcji tła; K_b - współczynnik kalibracji kanału Beta; a - współczynnik kompensacji na podstawie stosunku zliczeń Beta/Alfa, zmierzonego bez obecności sztucznej aktywności.

Co roku podpisywana jest z firmą Canberra-Packard umowa na przegląd, konserwację i kalibrację urządzeń aerozolowych pracujących na 7 stacjach wczesnego wykrywania skażeń. W roku 2023, zakres umowy obejmował również wymianę układu poboru powietrza. Prace objęte umową zostały wykonane w I połowie 2023 roku. W czasie wykonywania przeglądu na stacji w Zakopanem zdiagnozowano uszkodzenie detektora promieniowania alfa i beta oraz pompy układu powietrza. W ramach dodatkowej umowy z firmą Canberra-Packard, uszkodzone elementy zostały wymienione na nowe.

Pomiar globalnej aktywności izotopów emitujących promieniowanie beta w próbkach całkowitego opadu dobowego i miesięcznego – Zestaw TDSPI

Zestaw do pomiaru aktywności całkowitej beta oraz gamma badanych próbek składa się z:

- Dwutorowego spektrometru TDSPI,
- Sondy SSU-TD-BETA umieszczonej w ołowianym domku osłonnym DO-1,
- Rejestratora komputerowego z oprogramowaniem do sterowania spektrometrem i archiwizacji danych pomiarowych.

Spektrometr TDSPI jest samodzielnym, dwutorowym urządzeniem przeznaczonym do współpracy z dwiema niezależnymi sondami scyntylacyjnymi z fotopowielaczem. Tor pierwszy może współpracować

z sondą SSU-TD-BETA lub SSU-70. Tor drugi przystosowany jest do współpracy z sondą gamma z przedwzmacniaczem 2007P CANBERRA oraz zainstalowanym wewnątrz urządzenia analizatorem wielokanałowym TUKAN.

Każdy z torów zawiera:

- Zasilacz o zadawanym parametrycznie wysokim napięciu, do zasilania fotopowielacza sondy,
- Przedwzmacniacz,
- Wzmacniacz spektrometryczny o zadawanym parametrycznie wzmocnieniu zgrubnym i precyzyjnym,
- Analizator 512-kanałowy.

Spektrometr współpracuje z komputerem po łączu USB. Spektrometr nie posiada wyświetlacza. Sterowanie oraz wizualizacja i archiwizacja wyników pomiarowych odbywa się z poziomu komputera poprzez zainstalowane specjalistyczne oprogramowanie TDR.

We wspólnej obudowie TDSPI zainstalowane są:

1. Dwutorowy spektrometr TDSPI zawierający dwa niezależne tory spektrometryczne przystosowane do współpracy z sondami scyntylacyjnymi beta i/lub gamma (tor pierwszy z SSU-TD-BETA lub SSU-70, tor z CANBERRA). Każdy z nich zawiera:
 - a. zasilacz wysokiego napięcia (500-1500 V; 0,3 mA),
 - b. przedwzmacniacz,
 - c. wzmacniacz spektrometryczny o parametrycznie ustawianym wzmocnieniu zgrubnym (x1, x2, x4, x8) i precyzyjnym (1...4095)
 - d. analizator 512-kanałowy,
 - e. przelicznik do zliczania impulsów z danego zakresu energetycznego, w zadanym czasie (do 18 godzin) z zadaną ilością powtórzeń (do 255),
 - f. tor drugi wyposażony jest w wyjście impulsów spektrometrycznych przystosowane do wejścia analizatora wielokanałowego TUKAN (o amplitudzie do 10 V).
2. Uchwyty i miejsce umożliwiające zainstalowanie wewnątrz obudowy TDSPI analizatora wielokanałowego TUKAN,
3. Złącze sygnałowe z wyjścia toru drugiego do spektrometru TUKAN,
4. Zasilacze niskich napięć do zasilania:
 - a. huba USB oraz spektrometru TUKAN (+5 V / 300 mA),
 - b. spektrometru TDSPI
 - c. przedwzmacniacza sond SSU (+24 V / 15 mA) oraz gamma (+/-12 V),
5. Hub USB,
6. Interfejs USB/RS485 do spektrometrów TDSPI.

Sonda scyntylacyjna uniwersalna SSU-TD-BETA z zainstalowanym scyntylatorem BETA, przystosowana jest do instalowania w niej wymiennych scyntylatorów $\varnothing 40$ (alfa, beta i gamma), poprzez odkręcenie pierścienia na szczycie sondy. Sonda jest wyposażona w:

- Scyntylator BETA typu SPF-32,
- Fotopowielacz,

- Podstawkę fotopowielacza zintegrowaną z dzielnikiem napięcia i przedwzmacniaczem ładunkowym,
- Kable (sygnałowy, HV).

Rejestrator komputerowy i oprogramowanie w zestawie TDSPI

Specjalistyczne oprogramowanie komputera komunikuje się z urządzeniem poprzez port szeregowy RS232 i/lub USB, umożliwiając ustawienie wszystkich parametrów pracy urządzenia oraz czytanie wyników pomiarów. Główne funkcje programu:

1. Wybór aktywnej sondy scyntylacyjnej,
2. Ustawianie parametrów pracy torów spektrometrycznych przy podłączonych sondach pomiarowych (wysokie napięcie, wzmocnienie zgrubne i precyzyjne, czas pomiaru, ilość powtórzeń, próg dyskryminacji, zakres zliczania impulsów przez przelicznik),
3. Funkcja przelicznika umożliwiająca zliczania impulsów z zadanego zakresu z obydwu torów spektrometrycznych w zadanym czasie z zadaną ilością powtórzeń,
4. Wykonanie pomiarów kalibracyjnych, tła oraz aktywności próbek beta według ściśle założonej procedury pomiarowej (wymuszającej przed pomiarem próbki wykonanie pomiaru tła oraz kalibracji wzorcem w zadanym parametrycznie czasie),
5. Archiwizacja wyników pomiarowych w pamięci komputera,
6. Kontrola prawidłowości mierzonych wartości w odniesieniu do bezwzględnych zakresów zmienności, a także wartości średniej wraz z odchyleniem standardowym,
7. Blokowanie możliwości pomiaru poza okresem ważności współczynnika kalibracji,
8. Generowanie raportów z przeprowadzonych pomiarów (na drukarce i w postaci plików pdf),
9. Obsługa statusu próbek („prawidłowa”, „do ponownego pomiaru”, „do wysłania”, „wysłana”, „zniszczona”),
10. Automatyczne wyznaczanie charakterystyki podłączonych sond i prezentacja jej na ekranie,
11. Prezentacja wizualna zbieranych widm z podłączonych sond na ekranie oraz możliwość zapisu wykresów w formacie txt, xml, JPG, pdf,
12. Zmiana parametrów pracy (HV, próg dyskryminacji, wzmocnienia, zakres zliczania impulsów) wymusza wykonanie ponownej kalibracji,
13. Zapis i odczyt wszystkich bieżących i archiwalnych danych pomiarowych w plikach tekstowych oraz XML.

Wzory obliczeniowe:

1. Współczynnik kalibracji

$$K = A_w / ((N_{wt} - N_t) \cdot S) [Bq / (m^2 \cdot imp / min \cdot)]$$

2. Aktywność próbki

$$A = K \cdot (N_{pt} - N_t) [Bq / m^2]$$

3. Błąd statystyczny

$$\Delta = T \cdot \sqrt{(N_{pt} / t_p + N_t / t_0)}, \text{ dla pomiaru próbki}$$

$$\Delta = T \cdot \sqrt{(N_{wt} / t_w + N_t / t_0)}, \text{ dla pomiaru kalibracji}$$

4. Błąd statystyczny względny

$$a = \Delta / (N_{pt} - N_t) \cdot 100\%$$

$$b = \Delta / (N_{wt} - N_t) \cdot 100\%$$

5. Współczynnik dobroci

$$Q = (N_{wt} - N_t)^2 / N_t$$

Oznaczenia:

- A_w – aktywność wzorca na dzień pomiaru [Bq],
- S – powierzchnia kuwety [m^2],
- K – odpowiedni współczynnik kalibracji,
- A – aktywność próbki,
- Q – współczynnik dobroci,
- N_{wt} – średnia liczba impulsów wzorca na minutę,
- N_{pt} – średnia liczba impulsów próbki na minutę,
- N_t – średnia liczba impulsów tła na minutę,
- T – współczynnik ufności odpowiadający błędowi pierwszego,
- t_p – czas pomiaru próbki,
- t_w – czas pomiaru wzorca,
- t_0 – czas pomiaru tła.

W ramach współpracy z firmą TD-ELECTRONICS Tomasz Dudek w przypadku zauważonych nieprawidłowości w pracy zestawów TDSPI, są one na bieżąco diagnozowane i w razie potrzeby naprawiane. W maju 2023 r. firma TD-ELECTRONICS Tomasz Dudek dokonała naprawy zestawu spektrometrii beta TDSPI i SSUTD do pomiaru radioaktywności opadów atmosferycznych ze stacji wczesnego wykrywania skażeń w Poznaniu.

Metoda oznaczania izotopów emitujących promieniowanie gamma w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego z zastosowaniem spektrometrii gamma

Próbki miesięcznego opadu całkowitego z 9 stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych zostają zintegrowane w jedną próbkę analityczną miesięcznego opadu całkowitego, która poddana jest pomiarom z zastosowaniem spektrometrii gamma.

Pomiary aktywności promieniotwórczej izotopów emitujących promieniowanie gamma wykonywane są za pomocą zestawu spektrometrycznego składającego się z detektora HPGe o wydajności 41% i zdolności rozdzielczej 1,9 keV przy energii 1332 keV wraz z analizatorem dołączonym do rejestratora komputerowego z zainstalowanym oprogramowaniem. Analiza widm rejestrowanych w 8000 kanałów prowadzona jest z zastosowaniem oprogramowania Genie – 2000, które umożliwia opracowanie matematyczne widm oraz ich wizualizację i archiwizację.

Detektor umieszczony jest w domku osłonowym o ścianach o grubości 10 cm wykonanych z ołowiu, wyłożonych od wewnątrz blachą wykonaną z miedzi o grubości 4 mm.

Do kalibracji stosuje się wzorce w geometrii naczynia cylindrycznego o średnicy 40 mm stosowanego w pomiarach zawierające mieszaninę izotopów emitujących promieniowanie gamma – „mix gamma” przygotowane z wykorzystaniem roztworu wzorcowego BW/Z-63/19p1/20 wyprodukowanego przez Ośrodek Produkcji i Dystrybucji Izotopów w Świerku. Kalibrację przeprowadza się, wykorzystując wzorce o różnych wysokościach: 1, 3, 5, 7, 10, 15 mm, co umożliwia wybór odpowiedniej kalibracji dla próbek o różnej grubości warstwy popiołu. Dla uzyskania gęstości próbek opadu całkowitego w granicach 0,9 – 1,2 g cm^{-3} , zbliżonej do gęstości wzorców, próbki są prasowane

specjalnym przyrządem, który jednocześnie pozwala wyznaczyć grubość warstwy popiołu.

Charakterystykę wzorców, uwzględniającą grubość warstwy, gęstość i aktywności poszczególnych izotopów zestawiono w tabeli:

Kod wzorca			BW/Z-63/19p1/20					
Data referencyjna			1.12.2020					
Grubość warstwy			1mm	3mm	5mm	7mm	10mm	15mm
Izotop	Okres półrozpadu	Energia (MeV)	Aktywność na 1.01.2021 (Bq)					
²⁴¹ Am	432,6 ± 0,6 lat	0,026 0,060	50,96 ± 0,61	154,48 ± 1,85	251,73 ± 3,02	251,96 ± 3,02	246,92 ± 2,96	251,11 ± 3,01
¹⁰⁹ Cd	461,4 ± 1,2 dni	0,088	181,94 ± 3,89	551,56 ± 11,8	898,75 ± 19,22	899,59 ± 19,24	881,6 ± 18,86	896,56 ± 19,18
⁵⁷ Co	271,80 ± 0,05 dni	0,014 0,122 0,136	6,78 ± 0,06	20,56 ± 0,17	33,5 ± 0,28	33,53 ± 0,28	32,86 ± 0,27	33,42 ± 0,28
¹¹³ Sn	115,09 ± 0,03 dni	0,255 0,392	96,7 ± 1,41	293,15 ± 4,27	477,68 ± 6,96	478,12 ± 6,96	468,56 ± 6,82	476,51 ± 6,94
⁸⁵ Sr	64,850 ± 0,007 dni	0,514	29,09 ± 0,59	88,2 ± 1,79	143,72 ± 2,92	143,85 ± 2,93	140,98 ± 2,87	143,37 ± 2,92
¹³⁷ Cs	30,05 ± 0,08 lat	0,662	15,59 ± 0,22	47,26 ± 0,67	77,01 ± 1,08	77,08 ± 1,09	75,54 ± 1,06	76,82 ± 1,08
⁵⁴ Mn	312,13 ± 0,03 dni	0,835	39,98 ± 0,61	121,2 ± 1,85	197,5 ± 3,02	197,68 ± 3,02	193,73 ± 2,96	197,01 ± 3,01
⁶⁵ Zn	244,01 ± 0,09 dni	1,116	48,05 ± 0,76	145,67 ± 2,31	237,37 ± 3,76	237,59 ± 3,76	232,84 ± 3,69	236,79 ± 3,75
⁶⁰ Co	5,2710 ± 0,0008 lat	1,173 1,332	89,7 ± 1,12	271,93 ± 3,4	443,11 ± 5,53	443,52 ± 5,54	434,65 ± 5,43	442,02 ± 5,52

Wydajność dla poszczególnych linii energetycznych opisana jest równaniem:

$$\varepsilon(E) = \frac{N}{t y A_w K_w} \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon(E)$ – wydajność detektora dla fotonów o energii E

N – liczba zliczeń w danej linii widmowej po odjęciu tła

t – czas pomiaru w sekundach

y – wydajność kwantowa

A_w – aktywność wzorca (izotopu) na datę referencyjną

K_w – współczynnik korekcji rozpadu

$$K_w = e^{\frac{\ln(2)t_w}{T_{1/2}}} \quad (2)$$

t_w – czas jaki upłynął od daty referencyjnej wzorca (izotopu) do czasu kalibracji aparatury

$T_{1/2}$ – połowiczny czas rozpadu izotopu

Przygotowanie próbki do pomiarów spektrometrycznych obejmuje homogenizację próbki zbiorczej uzyskanej przez połączenie próbek opadu miesięcznego z 9 stacji, umieszczenie jej w cylindrycznych pojemnikach o średnicy 40 mm i zagęszczenie do uzyskania żądanej gęstości. Masa popiołu pojedynczych próbek, jak i zbiorczej, jest wyznaczana z dokładnością do 0,05 mg. Czas pomiaru próbki, jak i pomiaru tła, przeprowadzanych po każdym pomiarze próbki, wynosi 160 000 s.

Aktywność danego izotopu w próbce w chwili pomiaru określa równanie:

$$A_i = \frac{N_i}{t \varepsilon(E) y} \quad (3)$$

gdzie:

N_i – liczba zliczeń w danej linii widmowej po odjęciu tła,

$\varepsilon(E)$ – wydajność detektora dla fotonów o energii E

y – wydajność kwantowa

t - czas pomiaru w sekundach.

Przy pomiarach małych aktywności ważne jest, aby dana ilość zliczanych impulsów mogła być zaobserwowana przy zachowaniu określonego poziomu ufności, jako pik wyodrębniony z widma tła naturalnego danego detektora. W pomiarach realizowanych metodą spektrometrii gamma i przy wykorzystaniu oprogramowania GENIE 2000, za granicę oznaczalności definiowaną jako najmniejsza ilość lub najmniejsze stężenie substancji możliwe do ilościowego oznaczenia daną metodą analityczną z założoną dokładnością i precyzją przyjmuje się minimalną mierzalną aktywność (MDA – ang. *Minimum Detectable Activity*) wyznaczoną metodą Curie. Metoda ta bazuje na dwóch podstawowych parametrach: (i) poziomie krytycznym (L_C – ang. *critical level*), który jest definiowany jako poziom, poniżej którego całkowity sygnał nie może być wiarygodnie zidentyfikowany i (ii) limicie detekcji (L_D ang. – *detection limit*) określającym najmniejszy sygnał, który może być w sposób wiarygodny określony ilościowo. Minimalna mierzalna aktywność (MDA) obliczana jest na podstawie limitu detekcji L_D .

$$MDA = \frac{L_D}{t \varepsilon(E) y} \quad (4)$$

Przy czym stosuje się różne metody obliczania wartości L_D , tutaj przyjęto metodę Loyda A. Currie'go określoną wzorem:

$$L_D = 0,276 + 1,05\sigma \quad (5)$$

gdzie:

L_D – limit detekcji w impulsach.

σ - odchylenie standardowe tła w badanym pikie.

Limity detekcji zostały policzone dla poziomu ufności 0,70, przy założeniu, że czas pomiaru tła jest taki sam, jak czas pomiaru próbki.

Aktywność właściwą poszczególnych radionuklidów wyznaczano na podstawie zależności:

$$C_i = \frac{A_i}{b S} \exp(\lambda_i t_d) \quad (6)$$

gdzie:

A_i – aktywność i-tego izotopu w próbce,

λ_i – stała rozpadu,

t_d – czas trwania przerwy między zakończeniem ekspozycji próbki a rozpoczęciem pomiaru,

b – część masy próbki zbiorczej wziętej do analizy,

S – powierzchnia naczynia do zbierania opadu całkowitego (1500 cm²),

Dla aktywności oznaczanych nuklidów oblicza się odchylenia standardowe i podaje w zestawieniach

wyników.

Radiochemiczne oznaczanie ^{90}Sr w miesięcznym opadzie całkowitym

Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr oznaczane jest w zintegrowanej próbce miesięcznego opadu całkowitego, uprzednio analizowanego nieniszcząco metodą spektrometrii gamma. Oznaczenie ^{90}Sr prowadzi się metodą radiochemiczną obejmującą uzyskanie czystej radiochemicznie próbki (etap I i II) i zakończoną pomiarami promieniowania beta (etap III).

ETAP I – Chemiczne oczyszczanie próbki

1. Przeprowadzenie izotopu ^{90}Sr z próby opadu do roztworu.

Próbkę opadu miesięcznego o znanej masie umieszcza się w zlewce, zwilża wodą destylowaną i dodaje ok. 200 ml kwasu azotowego HNO_3 (1:1). Próbkę odparowuje się w ciągu 8 godzin, mieszając od czasu do czasu. Pozostałość w zlewce przesącza się przez twardy sączek. Osad jest odrzucany, przesącz uzupełniony wodą destylowaną do uzyskania 150 ml objętości.

2. Wytrącanie szczawianów.

- Do 150 ml przesączu dodaje się 100 ml 8% kwasu szczawiowego, 1 ml nośnika strontu, kilka kropli zieleni bromokrezolowej i stężony amoniak do uzyskania pH 4-4,5 (kolor ciemnozielony). Roztwór ogrzewa się do temp. 80°C w celu całkowitego wytrącenia osadu. Po opadnięciu osadu roztwór dekantuje się z nad osadu szczawianów.

- Osad szczawianów rozpuszcza się w roztworze (1:1) HNO_3 (na początku dodaje się kilka mililitrów kwasu, następnie dozuje się kwas kroplami aż do całkowitego rozpuszczenia osadu).

- Powtórne wytrącanie szczawianów przebiega w sposób analogiczny do pierwotnego (do roztworu dodaje się kroplami stężony amoniak do uzyskania pH 4-4,5 i wytrącenia osadu, następnie całość podgrzewa się do 80°C). Po całkowitym wytrąceniu osadu szczawianów roztwór przesącza się przez twardy sączek. Osad przepłukuje się dokładnie wodą destylowaną i pozostawia do wysuszenia.

3. Spopielenie osadu.

Sączek z osadem przenosi się do tygla i spala w piecu muflowym w temperaturze $650 - 700^\circ\text{C}$. Następnie tygiel wyjmuje się z pieca i studzi.

4. Rozpuszczanie popiołu.

Osad w tyglu zwilża się wodą destylowaną, dodaje kilka mililitrów HNO_3 (1:1) aż do całkowitego rozpuszczenia osadu. Roztwór z tygla przenosi się ilościowo do zlewki i uzupełnia wodą destylowaną do uzyskania objętości ok. 70 ml.

5. Wytrącanie chromianu baru.

Do zlewki z roztworem dodaje się 1 ml nośnika baru, kilka kropli czerwieni metylowej, 1 ml kwasu octowego 2 ml octanu amonu. Następnie dodaje się stężony amoniak do uzyskania pH 5,5 (kolor pomarańczowo – żółty). Próbkę ogrzewa się do 90°C , dodaje 1 ml chromianu sodu i ponownie sprowadza pH do 5,5 za pomocą amoniaku. Roztwór ogrzewa się do wytrącenia żółtego osadu chromianu baru. Następnie po ostygnięciu roztwór przesącza się przez sączek. Osad odrzuca się.

6. Wytrącanie wodorotlenku itru.

Do roztworu pozostałego po oddzieleniu chromianu baru dodaje się 1 ml nośnika itru. Roztwór ogrzewa się w temp. ok. 90°C . Po ostudzeniu dodaje się amoniak do uzyskania pH 8 i wytrącenia osadu wodorotlenku itru, który oddziela się przez sączenie. Pozostały po przesączeniu roztwór zlewa się do butelki polietylenowej, dodaje do niego HNO_3 (1:1) do uzyskania pH 2-3 i 1 ml nośnika itru. Tak przygotowaną próbkę pozostawia się na 18 dni.

ETAP II – Preparatyka próbki po osiągnięciu równowagi ^{90}Sr z ^{90}Y w roztworze po 18 dniach

7. Wytrącanie wodorotlenku itru.

Po 18 dniach roztwór z butelki przenosi się do zlewki i zagęszcza przez odparowanie do objętości ok. 50 ml. Następnie dodaje się stężony amoniak do uzyskania pH 8 i podgrzewa do wytrącenia wodorotlenku itru. Osad oddziela się od roztworu przez sączenie. Roztwór zlewa się do butelki, jego pH doprowadza się, za pomocą HNO_3 , do wartości 2-3 oraz dodaje 1 ml nośnika itru. Tak przygotowany roztwór, pozostawiony na 18 dni, umożliwia powtórne przeprowadzenie analizy oraz kontrolę poprawności oznaczeń.

8. Wytrącanie szczawianów itru.

Osad wodorotlenku itru rozpuszcza się w kilku mililitrach HNO_3 (1:1). Następnie dodaje się ok. 25 ml wody destylowanej, 15-20 kropli nasyconego roztworu kwasu szczawowego oraz amoniak do uzyskania pH 5,5, by wytrąciły się szczawiany. Roztwór ogrzewa się do temp. 60°C , do całkowitego wytrącenia szczawianów.

9. Przygotowanie próbki do pomiarów.

Roztwór przesącza się przez lejek radiochemiczny, używając sączka o geometrii stosowanej w pomiarach. Osad na sączku przepłukuje się alkoholem etylowym, aby przyspieszyć schnięcie. Sączek z osadem umieszcza się w miseczce pomiarowej.

ETAP III – Pomiar aktywności

Pomiar aktywności ^{90}Y równoważnej aktywności ^{90}Sr powinien być wykonany nie później niż 2 godziny od chwili oddzielenia $\text{Y}(\text{OH})_3$ od reszty roztworu. Jeżeli pomiar zostanie przeprowadzony później, należy uwzględnić rozpad promieniotwórczy ^{90}Y .

Pomiary aktywności prowadzone są z zastosowaniem niskotłowego licznika przepływowego LB 4200, który umożliwia równoległy pomiar 6 prób. Czas pomiaru próbek minimum 2 godz. Przed każdym pomiarem mierzone jest tło, które nie przekracza wartości 0,6 imp/min. Kalibrację aparatury pomiarowej przeprowadza się z użyciem preparatu wzorcowego ^{90}Y o znanej aktywności i geometrii identycznej z geometrią próbek.

Obliczanie aktywności ^{90}Sr w próbach opadu całkowitego:

$$A = \frac{N_0 \times \eta}{S},$$

gdzie:

A – aktywność [Bq m^{-2}]

N_0 – ilość impulsów na minutę netto (wynikająca z różnicy pomiędzy całkowitą ilością impulsów na minutę – N i ilością impulsów na minutę tła – N_t)

η - współczynnik kalibracji [Bq/imp/min] S – powierzchnia zbierająca [m^2]

W przypadku, gdy czas, który upłynął od chwili oddzielenia $\text{Y}(\text{OH})_3$ od roztworu do rozpoczęcia pomiaru przekracza 2 godziny, należy zastosować mnożnik uwzględniający rozpad promieniotwórczy radioizotopu ^{90}Y :

$$e^{\frac{0,693(t_1-t_0)}{64}},$$

gdzie:

t_0 – godzina oddzielenia osadu od roztworu

t_1 – godzina odpowiadająca połowie czasu pomiaru próbki

$(t_1 - t_0)$ – różnica wyrażona w godzinach

Błąd pomiaru:

$$\sigma = \sqrt{\frac{N}{t_p} + \frac{N_t}{t_{pt}}} \times \frac{A}{N_0}, \text{ gdzie:}$$

σ - błąd pomiaru [Bq m^{-2}], t_p – czas pomiaru próby [min], t_{pt} – czas pomiaru tła [min]

$$LLD = 4,66 \sqrt{\frac{N_0}{t_{pt}}} \times \frac{\eta}{S}, \text{ gdzie: LLD } [\text{Bq m}^{-2}]$$

3. Wyniki i omówienie wyników z 2023 roku wraz z odniesieniem do okresu 2000-2022

3.1. Moc dawki promieniowania gamma w powietrzu

Moc dawki promieniowania gamma definiujemy jako ilość energii promieniowania jonizującego przekazaną jednostce masy w jednostce czasu. Jednostką dawki skutecznej w układzie SI jest siwert [Sv].

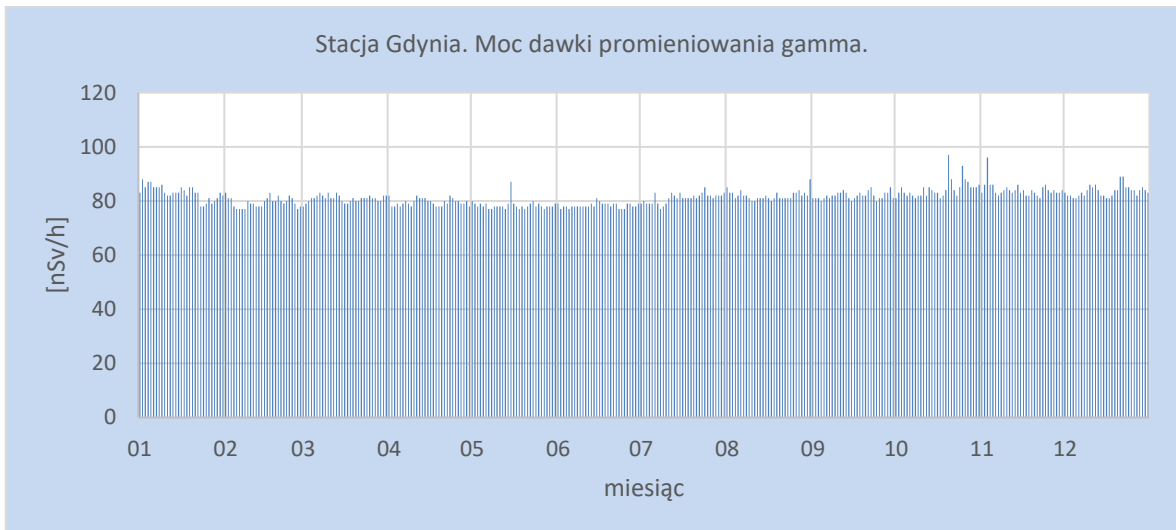
W 2023 roku wartości mocy dawki promieniowania gamma w atmosferze mierzone były w reżimie dobowym na 9 stacjach IMGW-PIB: Warszawa, Gdynia, Mikołajki, Gorzów Wielkopolski, Świnoujście, Legnica, Włodawa, Zakopane, Lesko. Pomiarzy były prowadzone z wykorzystaniem sondy TDSG (Rys. 2-10). Analizując dane, najniższą średnią miesięczną wartość 62,3 nSv/h uzyskano w grudniu na stacji Warszawa, maksymalną wartość zarejestrowano w czerwcu w Zakopanem – 104,8 nSv/h (Tabela 1). Najniższa średnia roczna moc dawki promieniowania gamma uzyskana z wartości dobowych – 65,7 nSv/h charakteryzowała stacje w Warszawie oraz we Włodawie, nieco wyższa wartość wystąpiła na stacji Świnoujście (68,4 nSv/h). Zbliżone wyniki odnotowano odpowiednio na stacjach: Gdynia, Mikołajki, Gorzów Wielkopolski, Legnica (między 80 a 90 nSv/h) oraz Zakopane, Lesko (powyżej 90 nSv/h). Najwyższe wartości mocy dawki odnotowane w Zakopanem mają jednoznacznie związek z faktem, że promieniowanie w rejonach górskich jest największe. Na stacjach: Warszawa, Świnoujście, Włodawa średnia roczna moc dawki promieniowania gamma była niższa niż średnia z całej Polski (80,9 nSv/h). W Gdyni średnia wartość nieznacznie przekroczyła średnią roczną wyliczoną ze wszystkich stacji, natomiast w Mikołajkach, Legnicy Zakopanem i Lesku wartości były znacznie wyższe niż średnia roczna. Otrzymane wyniki wskazują na brak zmienności sezonowej, co oznacza, że głównym elementem determinującym moc dawki promieniowania gamma jest lokalizacja geograficzna.

Tabela 1. Średnie miesięczne wartości mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu w 2023 roku [nSv/h]

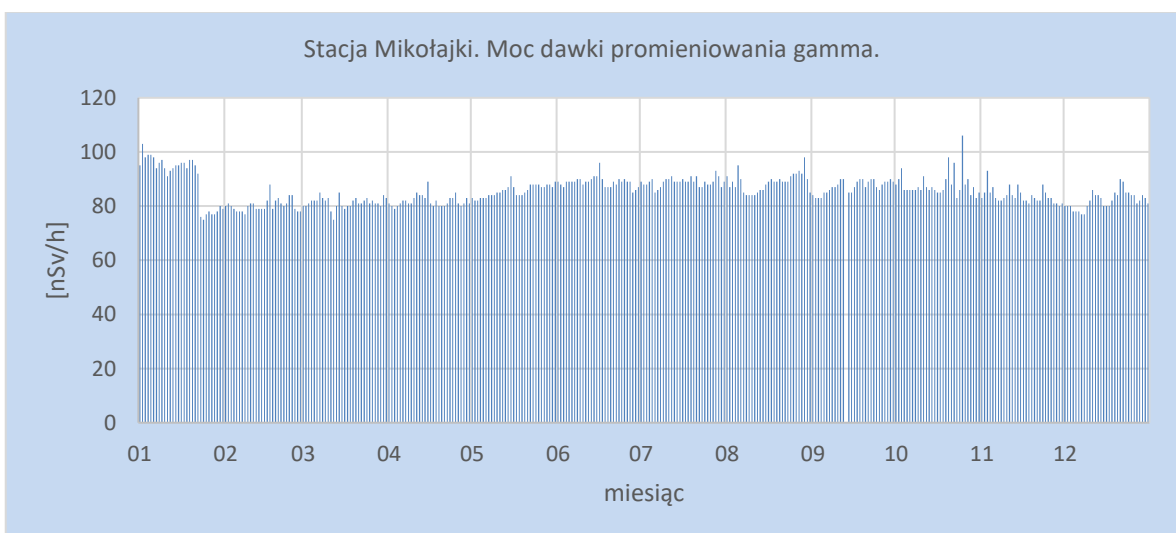
Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	75,1	83,1	90,5	91,6	74,2	90,1	71,7	98,3	96,7	85,7
Luty	63,0	79,5	80,3	81,4	67,0	84,3	63,3	69,5	77,3	74,0
Marzec	65,2	80,9	81,3	82,5	68,2	86,4	64,4	92,0	90,1	79,0
Kwiecień	65,1	79,6	81,9	82,2	67,2	85,8	64,1	102,6	89,6	79,8
Maj	65,4	78,5	85,7	82,7	67,6	88,3	63,8	102,1	90,2	80,5
Czerwiec	68,2	78,3	88,9	85,4	68,1	93,0	65,1	104,8	91,6	82,6
Lipiec	66,9	81,1	88,9	86,1	67,3	94,8	66,0	103,0	94,4	83,2
Sierpień	65,1	82,0	88,8	83,9	66,4	90,9	65,5	102,2	93,3	82,0
Wrzesień	63,1	82,0	87,3	84,4	67,1	91,2	65,6	101,2	94,0	81,8
Październik	65,6	84,5	88,1	85,4	69,3	92,4	68,1	101,2	93,0	83,1
Listopad	62,9	84,1	83,8	83,7	69,1	85,0	65,8	99,3	90,8	80,5
Grudzień	62,3	83,6	82,1	83,5	68,8	85,1	65,2	88,0	86,9	78,4
Minimalna średnia dawka miesięczna	62,3	78,3	80,3	81,4	66,4	84,3	63,3	69,5	77,3	74,0
Maksymalna średnia dawka miesięczna	75,1	84,5	90,5	91,6	74,2	94,8	71,7	104,8	96,7	85,7
Średnia roczna	65,7	81,4	85,7	84,4	68,4	89,0	65,7	97,1	90,8	80,9



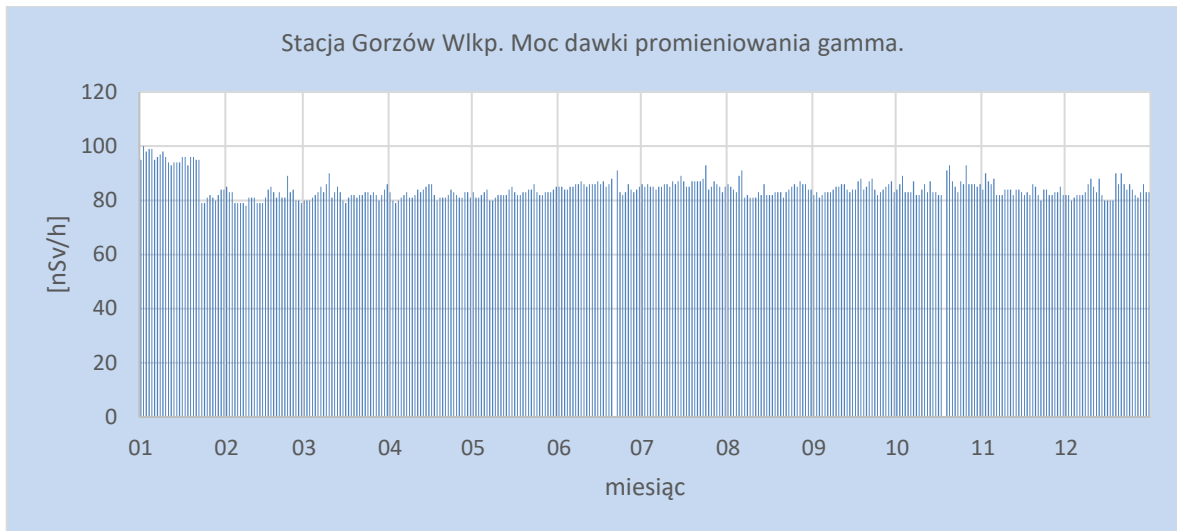
Rys. 2. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Warszawa w 2023 roku



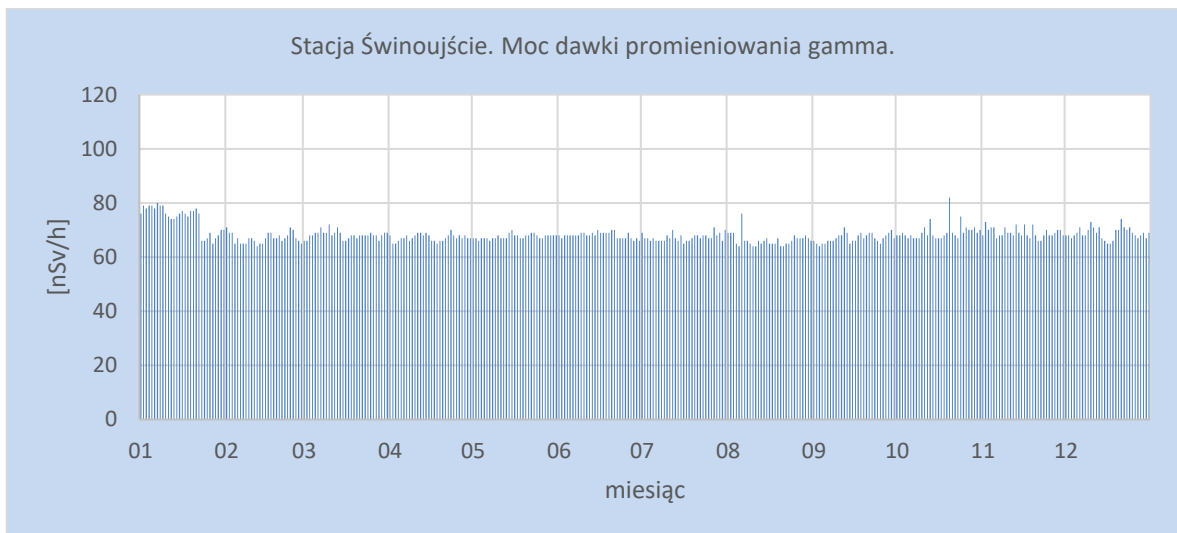
Rys. 3. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gdynia w 2023 roku



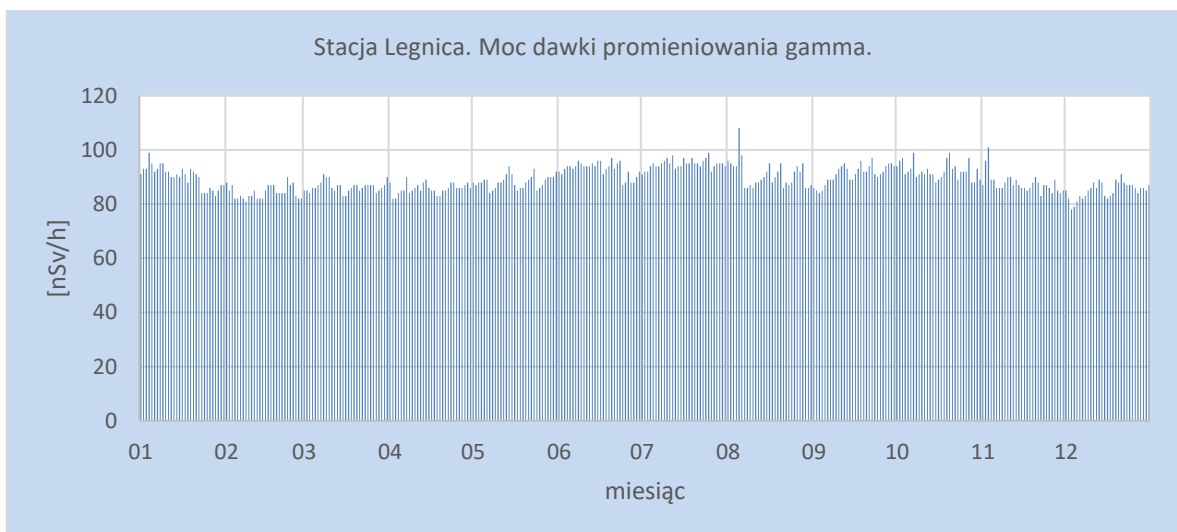
Rys. 4. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Mikołajki w 2023 roku



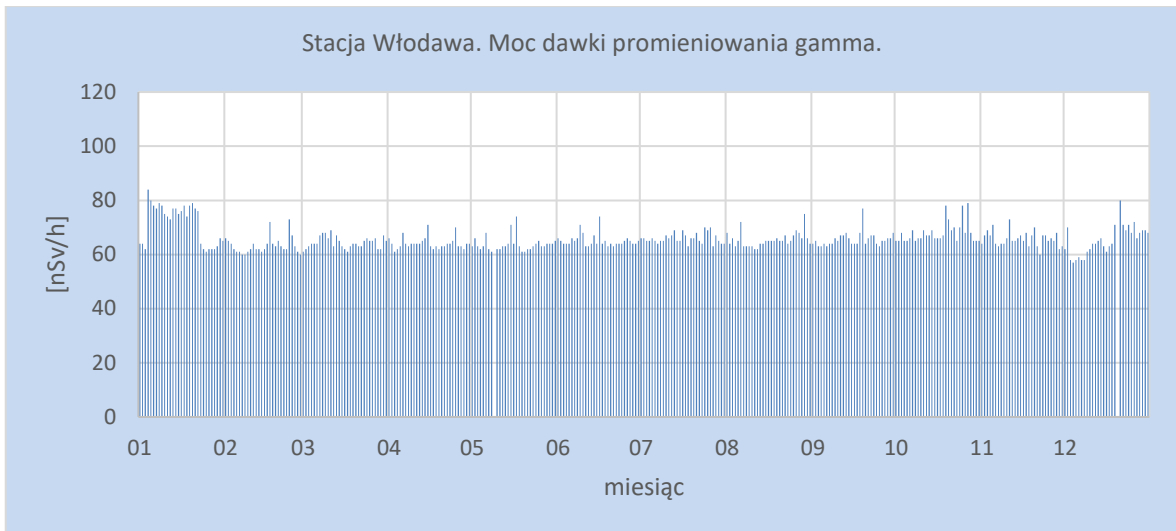
Rys. 5. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gorzów Wlkp. w 2023 roku



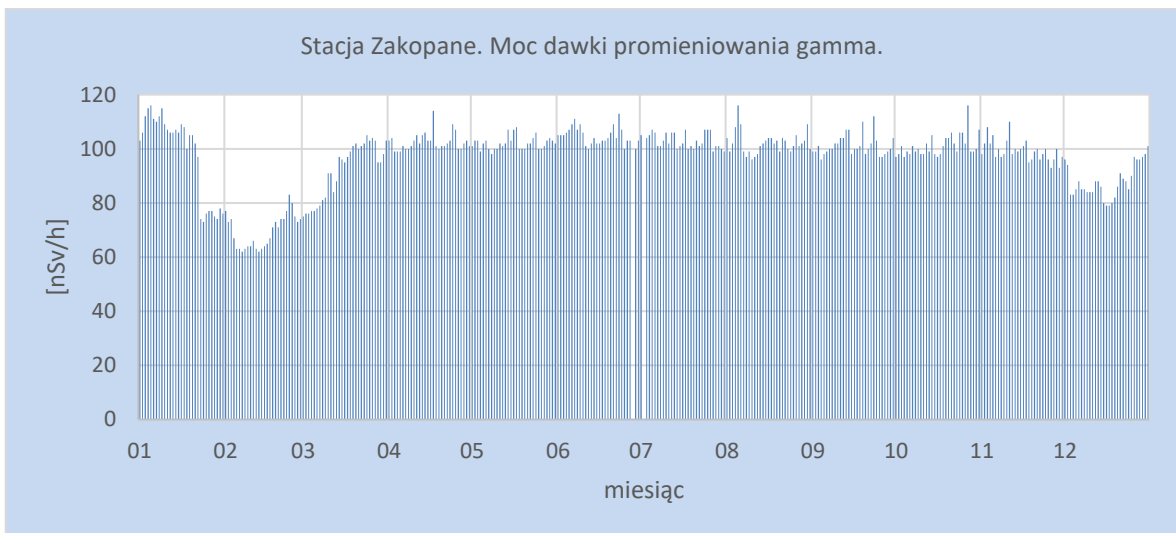
Rys. 6. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Świnoujście w 2023 roku



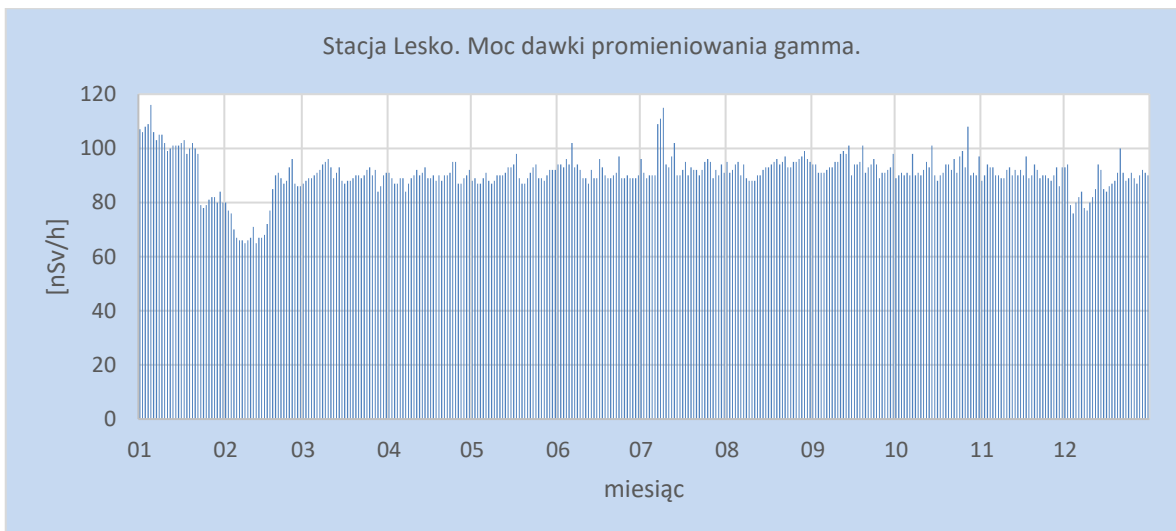
Rys. 7. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Legnica w 2023 roku



Rys. 8. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Włodawa w 2023 roku



Rys. 9. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Zakopane w 2023 roku



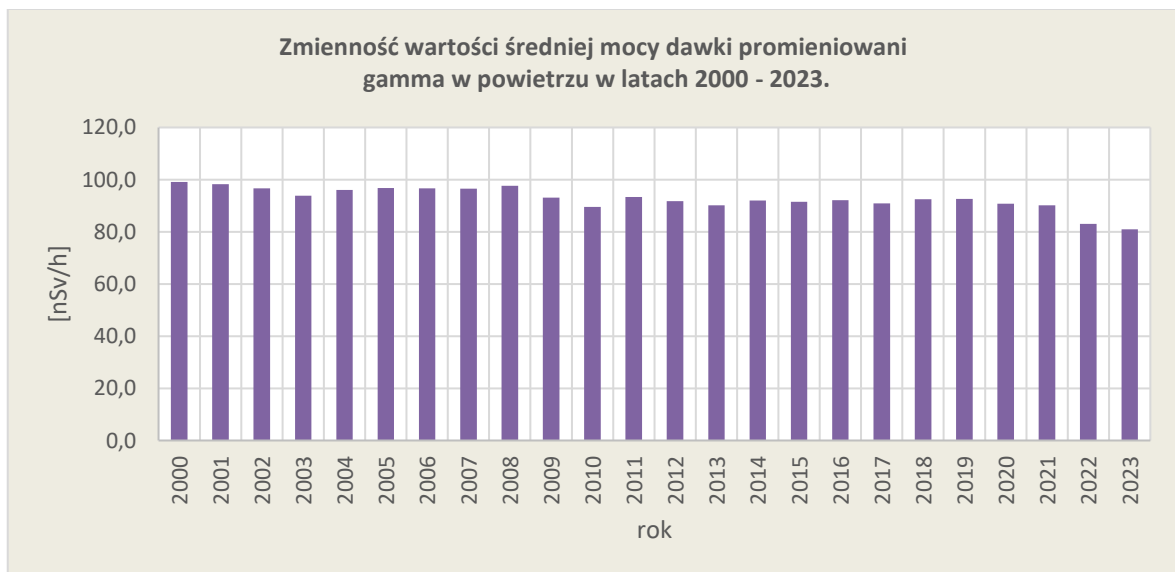
Rys. 10. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Lesko w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnia roczna wartość mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu wyznaczona na podstawie danych dobowych zmierzonych na 9 stacjach w 2023 roku wyniosła 80,9 nSv/h i jest niższa od obserwowanej w roku poprzednim o 2,2 nSv/h (Tabela 2, Rys. 11). W latach 2000-2023 nie obserwowano wyraźnych trendów ani istotnych zmian średniej mocy dawki promieniowania gamma charakterystycznej dla obszaru Polski. W omawianym okresie wartości te zmieniały się w przedziale od 80,9 nSv/h w 2023 roku do 99,1 nSv/h w 2000. Średnia wartość mocy dawki promieniowania gamma uzyskana ze średnich rocznych w badanych latach wynosiła 92,8 nSv/h.

Tabela 2. Wartość średniej rocznej mocy dawki promieniowania gamma w latach 2000-2023 [nSy/h]

Rok	Średnia roczna moc dawki promieniowania gamma	Rok	Średnia roczna moc dawki promieniowania gamma
2000	99,1	2013	90,1
2001	98,3	2014	92,0
2002	96,7	2015	91,5
2003	93,8	2016	92,1
2004	96,1	2017	90,9
2005	96,8	2018	92,5
2006	96,7	2019	92,6
2007	96,6	2020	90,8
2008	97,7	2021	90,1
2009	93,1	2022	83,1
2010	89,6	2023	80,9
2011	93,3	Średnia	92,8
2012	91,8	Minimalna	80,9
		Maksymalna	99,1



Rys. 11. Średnia roczna moc dawki promieniowania gamma w latach 2000-2023

3.2. Radioaktywność próbek aerozoli w powietrzu

Pochodzenie promieniotwórczości naturalnej jest związane z oddziaływaniem promieniowania kosmicznego na jądra atomów gazów w atmosferze, w wyniku czego powstają izotopy promieniotwórcze, oraz z radioizotopami znajdującymi się w skorupie ziemskiej. Skały skorupy ziemskiej zawierają izotopy promieniotwórcze wchodzące w skład trzech szeregów promieniotwórczych, w ramach których zachodzą przemiany jądrowe i przekształcanie jednych atomów w inne. W wyniku przemian powstają również izotopy gazowe, które kształtują poziom radioaktywności atmosfery. Każdy rejon ma inny poziom promieniowania naturalnego wynikający właśnie z różnic geologicznych i związanej z tym różnej zawartości izotopów naturalnych w środowisku. W rejonach górzystych obserwujemy zwiększone naturalne promieniowanie gamma z racji skalnego podłoża oraz wysokości, która powoduje wzrost mocy dawki pochodzącej od promieniowania kosmicznego 2 razy co każde 1,8 kilometra.

Stężenie izotopów promieniotwórczych w atmosferze zależy również od warunków meteorologicznych.

W 2023 roku na 7 stacjach badawczych zostały wykonane pomiary poziomu radioaktywności w próbkach aerozoli związane z obecnością izotopów emitujących promieniowanie alfa, pochodzenia naturalnego i sztucznego, oraz z obecnością izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta.

Promieniowanie alfa są to cząstki powstające w wyniku reakcji jądrowych i składają się z dwóch protonów i dwóch neutronów, mają postać identyczną z jądrem izotopu helu i mają ładunek dodatni.

Promieniowanie beta jest to strumień elektronów (promieniowanie β^-) lub pozytronów (promieniowanie β^+) powstających w wyniku reakcji jądrowych.

3.2.1 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego emitujących promieniowanie alfa

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

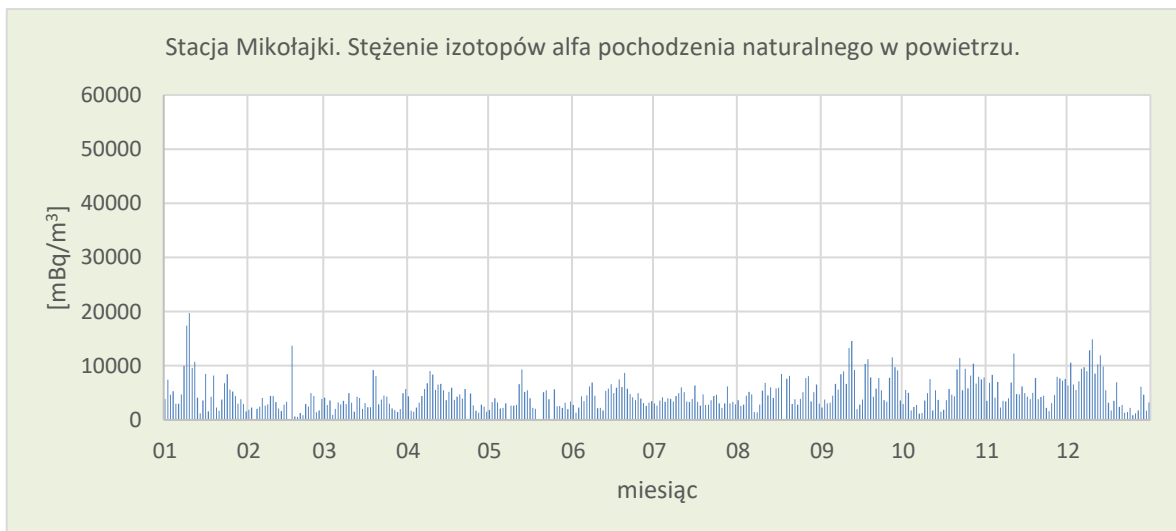
Średnie miesięczne stężenia izotopów alfa promieniotwórczych w 2023 roku zmieniały się w szerokim zakresie (Tabela 3, Rys. 12-18). Minimalną średnią miesięczną wartością $1,9 \text{ Bq/m}^3$ charakteryzowały się aerozole zebrane w sierpniu w Świnoujściu, natomiast wartością $2,2 \text{ Bq/m}^3$ w maju we Włodawie. W pozostałych lokalizacjach wartości mieściły się w przedziale od $2,7 \text{ Bq/m}^3$ (Zakopane) do $4,1 \text{ Bq/m}^3$ (Lesko). Maksymalne średnie miesięczne stężenia izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa mieściły się w zakresie: od najniższego zarejestrowanego w grudniu na stacji Świnoujście ($4,6 \text{ Bq/m}^3$) do najwyższego równego $16,4 \text{ Bq/m}^3$ przypadającego na październik w Gorzowie Wielkopolskim.

Analizując miesięczne wartości średnie obliczone na podstawie danych z 7 stacji stwierdzono, że najwyższe wartości notowane były w październiku ($16,4 \text{ Bq/m}^3$) i czerwcu (11 Bq/m^3). Najniższe zanotowano w sierpniu ($1,9 \text{ Bq/m}^3$), maju ($2,2 \text{ Bq/m}^3$) oraz listopadzie ($2,7 \text{ Bq/m}^3$).

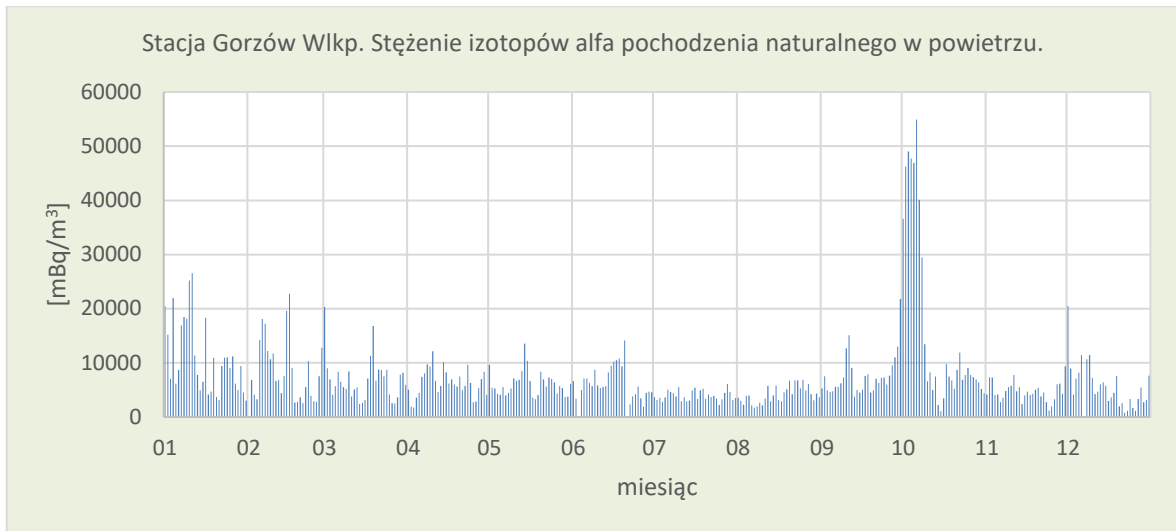
Wysokie wartości stężenia izotopów pochodzenia naturalnego alfa promieniotwórczych na przełomie września i października 2023 obserwowane na stacji w Gorzowie Wlkp. mogły być spowodowane długim okresem bezdeszczowym we wrześniu i następującym po nim okresem intensywnych opadów, powodujących wypłukanie zanieczyszczeń z atmosfery.

Tabela 3. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach w 2023 [Bq/m³]

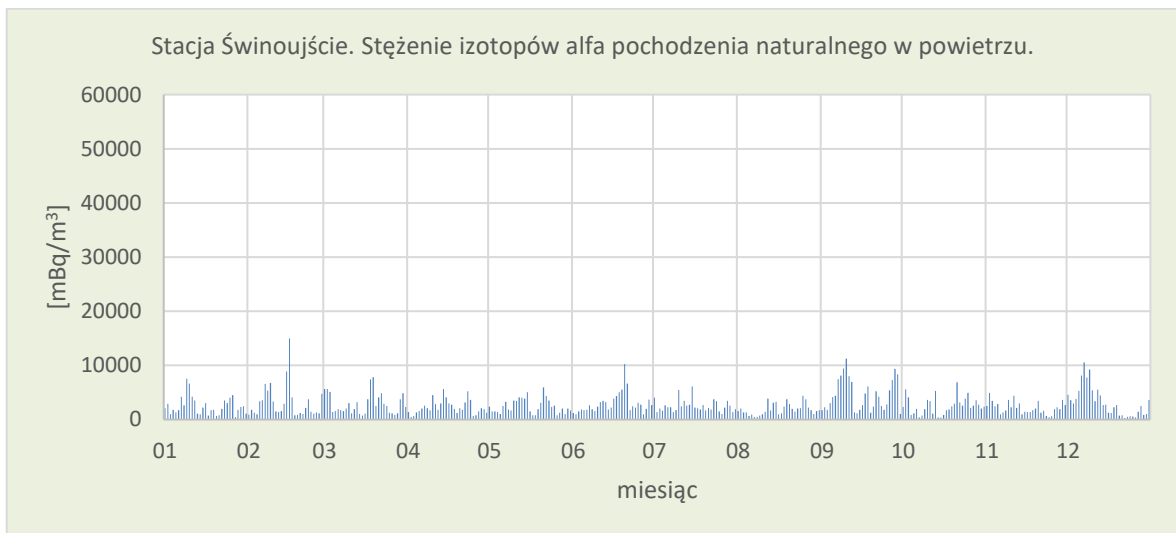
Miesiąc	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	5,8	11,0	2,5	7,2	4,0	7,7	5,7	6,3
Luty	3,0	8,6	3,2	6,0	3,3	5,9	4,4	4,9
Marzec	3,5	6,9	2,9	5,4	2,6	6,3	5,7	4,7
Kwiecień	4,3	6,3	2,3	7,0	2,3	7,4	6,7	5,2
Maj	3,7	6,1	2,5	8,4	2,2	b.d.	7,2	5,0
Czerwiec	4,4	6,4	2,9	11,0	3,0	5,6	8,8	6,0
Lipiec	3,8	3,9	2,5	8,8	3,3	3,9	7,7	4,8
Sierpień	4,8	4,1	1,9	5,6	4,1	4,4	7,7	4,7
Wrzesień	6,7	7,6	4,6	10,7	6,0	5,4	9,1	7,2
Październik	5,2	16,4	2,6	6,5	4,9	3,7	5,9	6,5
Listopad	5,3	4,7	2,2	3,3	4,1	2,7	4,1	3,8
Grudzień	5,9	5,7	3,2	3,3	4,9	4,7	6,3	4,9
Minimalna średnia dawka miesięczna	3,0	3,9	1,9	3,3	2,2	2,7	4,1	3,8
Maksymalna średnia dawka miesięczna	6,7	16,4	4,6	11,0	6,0	7,7	9,1	7,2
Średnia roczna	4,7	7,3	2,8	6,9	3,8	5,1	6,6	5,3



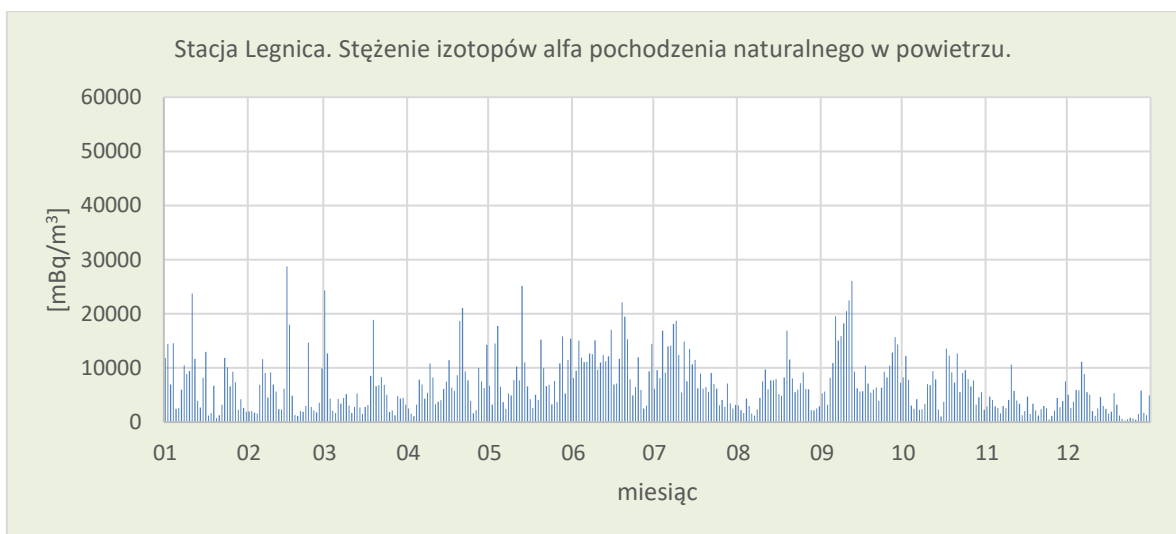
Rys.12. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Mikołajki w 2023 roku



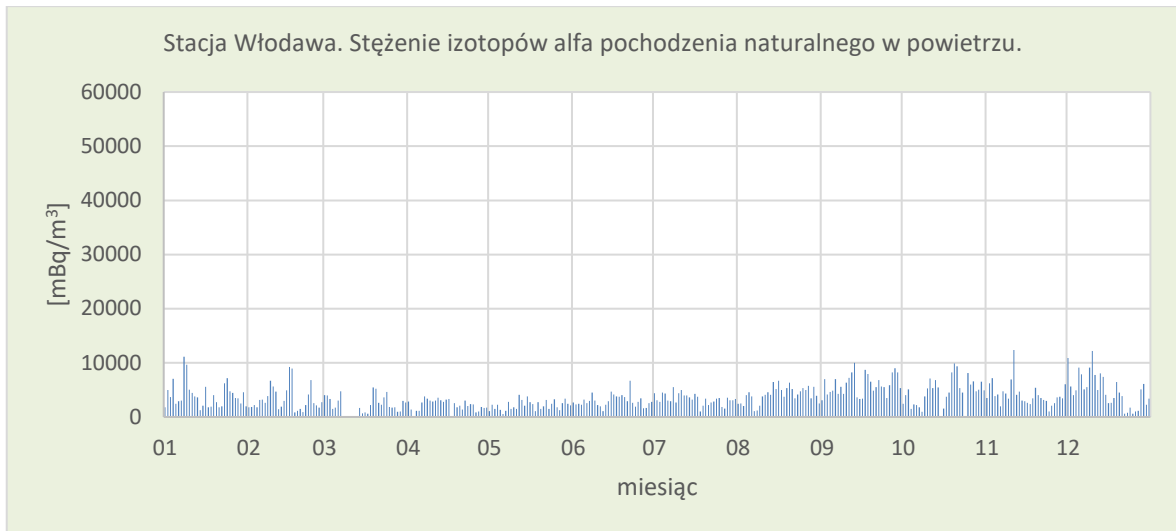
Rys.13. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Gorzów Wlkp. w 2023 roku



Rys.14. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Świnoujście w 2023 roku



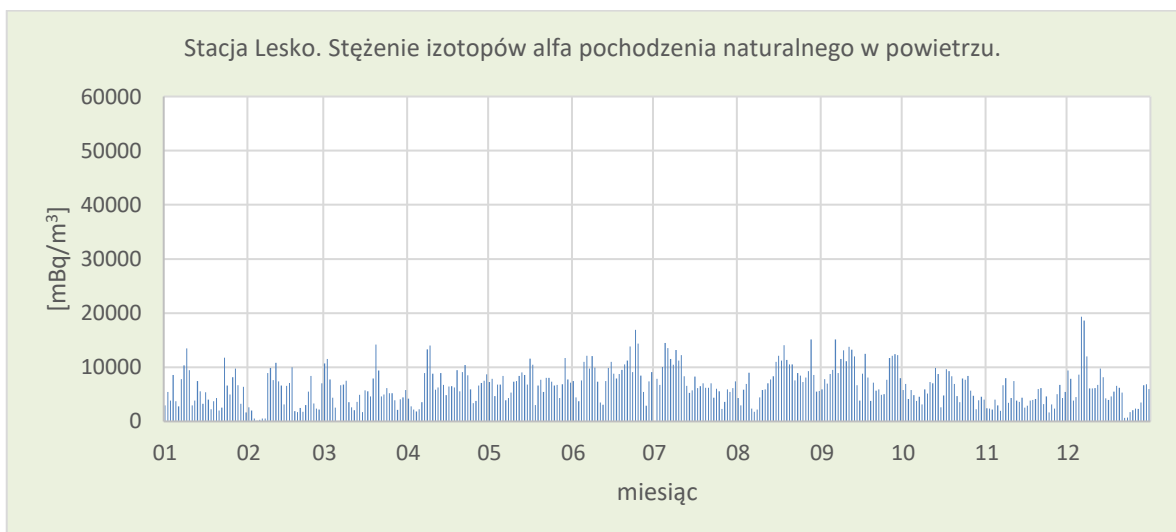
Rys.15. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Legnica w 2023 roku



Rys.16. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Włodawa w 2023 roku



Rys. 17. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Zakopane w 2023 roku



Rys.18. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Lesko w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W roku 2023 średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolach zawieszonych w powietrzu było niższe niż w roku ubiegłym i wynosiło 5,3 Bq/m³ (Tabela 4). Zbliżone wartości otrzymano również w latach: 2000, 2001 i 2013. W okresie ostatnich 24 lat nie obserwuje się jednoznacznych trendów zmian. Najniższe średnie stężenie (4,9 Bq/m³) charakteryzowało rok 2001, najwyższe natomiast (8,6 Bq/m³) wystąpiło w 2008 roku. Średnia obliczona na podstawie danych z okresu 2000-2023 wynosi 7,1 Bq/m³. Zmienność stężeń promieniotwórczych izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolach, jak wspomniano na początku rozdziału, wynika zarówno z czynników meteorologicznych, jak również z naturalnych procesów zachodzących w skorupie ziemskiej oraz oddziaływania promieniowania kosmicznego.

Tabela 4. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego emitujących promieniowanie alfa w latach 2000-2023 [Bq/m³]

Rok	Średnie roczne stężenie	Rok	Średnie roczne stężenie
2000	5,6	2013	5,4
2001	4,9	2014	7,4
2002	6,3	2015	7,2
2003	7,8	2016	7,7
2004	7,1	2017	6,4
2005	7,4	2018	7,9
2006	8,0	2019	7,5
2007	7,5	2020	8,4
2008	8,6	2021	8,3
2009	8,2	2022	7,1
2010	7,0	2023	5,3
2011	7,4	Średnia	7,1
2012	6,0	Minimalna	4,9
		Maksymalna	8,6

3.2.2 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie alfa pochodzenia antropogenicznego w 2023 roku zmieniały się w stosunkowo wąskim zakresie od 0 do 0,236 Bq/m³. Minimalne średnie miesięczne wartości mieściły się w przedziale od 0 Bq/m³ w listopadzie i grudniu w Mikołajkach, 0,001 Bq/m³ w kwietniu w Lesku i 0,006 Bq/m³ w grudniu w Świnoujściu i Włodawie do 0,065 Bq/m³ wartości zarejestrowanej w kwietniu w Zakopanem. Maksymalne średnie wartości mieściły się w przedziale od 0,016 Bq/m³ w maju w Mikołajkach i 0,021 Bq/m³ w październiku w Lesku do 0,236 Bq/m³ w październiku w Zakopanem (Tabela 5, Rys. 19-25).

Średnia obliczona dla kolejnych miesięcy na podstawie danych ze wszystkich stacji zmieniała się w dość wąskim zakresie od 0,029 Bq/m³ (kwiecień) do 0,076 Bq/m³ – wartości wyznaczonej z danych we wrześniu. Średnia roczna dobową, czyli średnia ze wszystkich dni pomiarowych obliczona dla wszystkich stacji, wynosi 0,051 Bq/m³. Biorąc pod uwagę tę wartość i wartość analogiczną wyznaczoną dla promieniowania alfa o podłożu naturalnym, należy stwierdzić, że udział promieniowania pochodzenia antropogenicznego jest bardzo niewielki i wynosi zaledwie 0,962% promieniowania pochodzenia naturalnego.

Tabela 5. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w aerozolach w 2023 roku [Bq/m³]

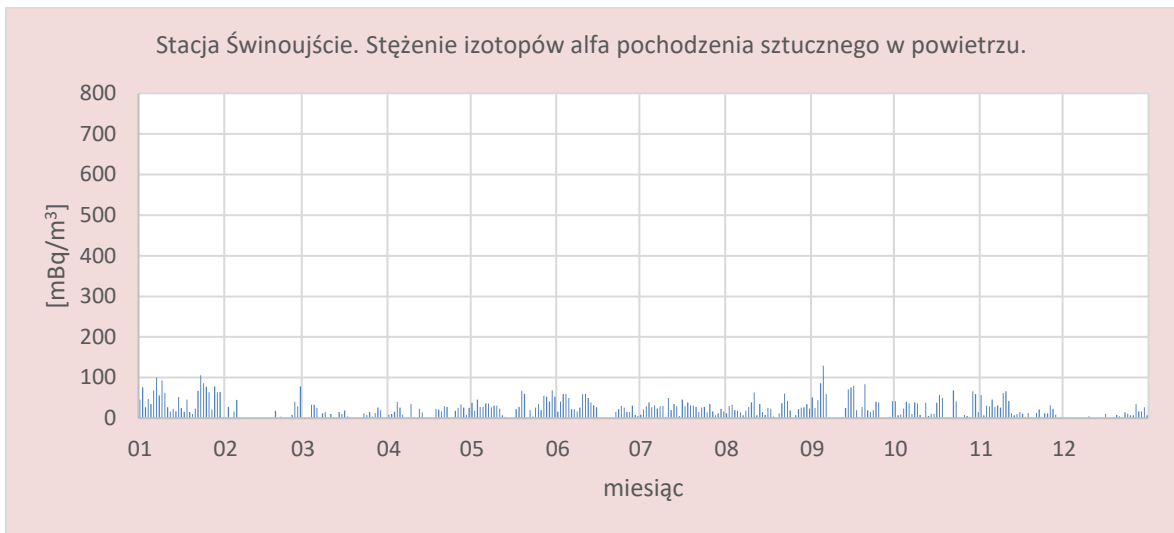
Miesiąc	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	0,014	0,099	0,049	0,203	0,008	0,068	0,009	0,064
Luty	0,012	0,054	0,010	0,021	0,016	0,111	0,010	0,033
Marzec	0,002	0,071	0,009	0,040	0,016	0,089	0,008	0,034
Kwiecień	0,003	0,069	0,015	0,020	0,031	0,065	0,001	0,029
Maj	0,016	0,138	0,029	0,058	0,053	b.d.	0,007	0,050
Czerwiec	0,008	0,110	0,025	0,024	0,046	0,073	0,012	0,043
Lipiec	0,003	0,131	0,025	0,075	0,054	0,143	0,006	0,062
Sierpień	0,007	0,139	0,023	0,091	0,044	0,176	0,013	0,070
Wrzesień	0,009	0,129	0,032	0,089	0,031	0,229	0,011	0,076
Październik	0,005	0,046	0,024	0,090	0,031	0,236	0,021	0,065
Listopad	0,000	0,102	0,021	0,083	0,016	0,145	0,015	0,055
Grudzień	0,000	0,063	0,006	0,066	0,006	0,093	0,004	0,034
Minimalna średnia dawka miesięczna	0,000	0,046	0,006	0,020	0,006	0,065	0,001	0,029
Maksymalna średnia dawka miesięczna	0,016	0,139	0,049	0,203	0,054	0,236	0,021	0,076
Średnia roczna	0,006	0,096	0,022	0,072	0,030	0,136	0,010	0,051



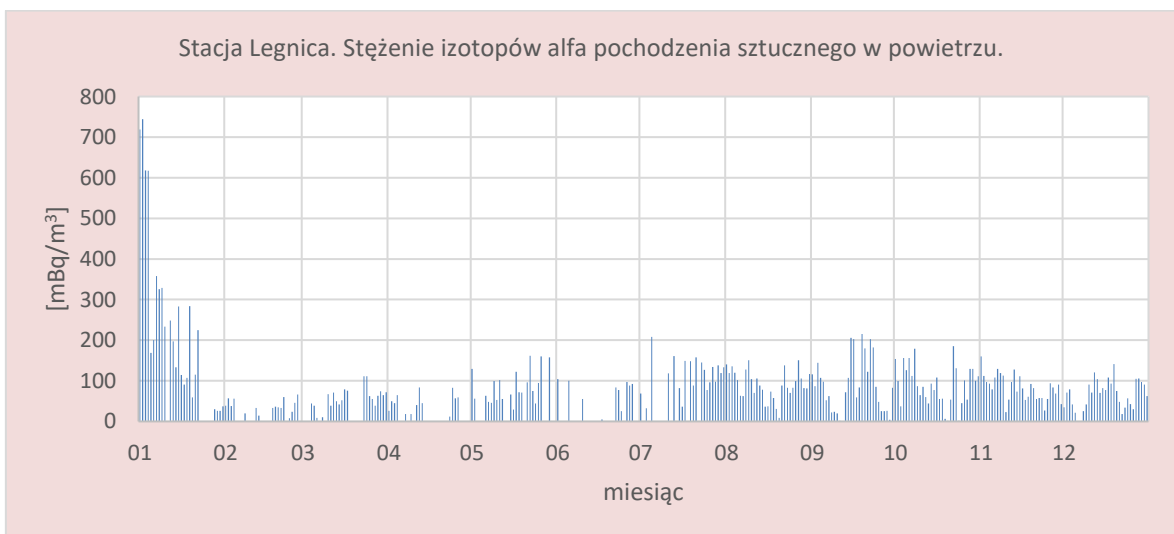
Rys.19. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Mikołajki w 2023 roku



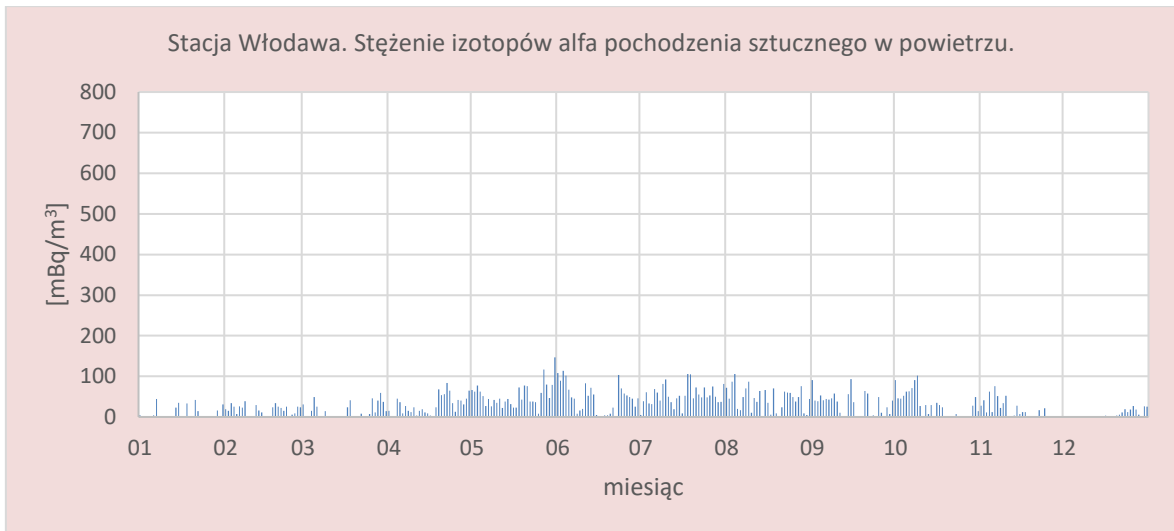
Rys.20. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp. w 2023 roku



Rys.21. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Świnoujście w 2023 roku



Rys.22. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Legnica w 2023 roku



Rys.23. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Włodawa w 2023 roku



Rys.24. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Zakopane w 2023 roku



Rys.25. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w 2023 roku wyniosło 0,051 Bq/m³ i było około 3,2 razy niższe niż w roku poprzednim. W badanym okresie najniższe średnie roczne stężenie 0,004 Bq/m³ przypada na rok 2001. Średnie stężenie wyznaczone dla okresu 2000-2023 wynosi 0,044 Bq/m³ (Tabela 6).

Tabela 6. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa pochodzenia sztucznego w latach 2000-2023 [Bq/m³]

Rok	Średnie roczne stężenie	Rok	Średnie roczne stężenie
2000	0,023	2013	0,033
2001	0,004	2014	0,030
2002	0,005	2015	0,074
2003	0,015	2016	0,065
2004	0,016	2017	0,055
2005	0,019	2018	0,044
2006	0,029	2019	0,086
2007	0,025	2020	0,084
2008	0,034	2021	0,062
2009	0,040	2022	0,164
2010	0,039	2023	0,051
2011	0,039	Średnia	0,044
2012	0,029	Minimalna	0,004
		Maksymalna	0,164

3.2.3 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

W przypadku izotopów antropogenicznych emitujących promieniowanie beta najniższą wartość średniego miesięcznego stężenia zaobserwowano w listopadzie i grudniu na stacji Mikołajki (0 Bq/m³). W pozostałych lokalizacjach średnie minimalne stężenia mieściły się w przedziale od 0,047 Bq/m³, wartości charakterystycznej dla stacji Włodawa, do 0,211 Bq/m³ w Zakopanem (Tabela 7, Rys. 26-32). Najniższą maksymalną średnią miesięczną wartość uzyskano w maju na stacji Mikołajki (0,029 Bq/m³), natomiast najwyższą na stacji Gorzów Wlkp. w sierpniu (0,593 Bq/m³).

Biorąc pod uwagę średnią roczną obliczoną ze średnich dla wszystkich miesięcy najniższe wyniki zanotowano w Mikołajkach (0,009 Bq/m³) oraz w Lesku (0,156 Bq/m³), a najwyższy w Gorzowie Wlkp. (0,428 Bq/m³). Wartości średniego stężenia wyznaczone dla poszczególnych miesięcy z wyników uzyskanych na 7 stacjach mieściły się w przedziale od 0,146 Bq/m³ w lutym do 0,321 Bq/m³ w sierpniu. Najwyższe wartości utrzymywały się od maja do listopada, przyjmując kolejno wartości: 0,252 Bq/m³, 0,230 Bq/m³, 0,310 Bq/m³, 0,321 Bq/m³, 0,319 Bq/m³, 0,278 Bq/m³, 0,259 Bq/m³. Taki układ może sugerować zależność aktywności beta w aerozolu od sezonu, wskazując na większe stężenia w cieplejszych miesiącach, związane z tempem wymywania aerozoli przez deszcz.

Tabela 7. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach w 2023 roku [Bq/m³]

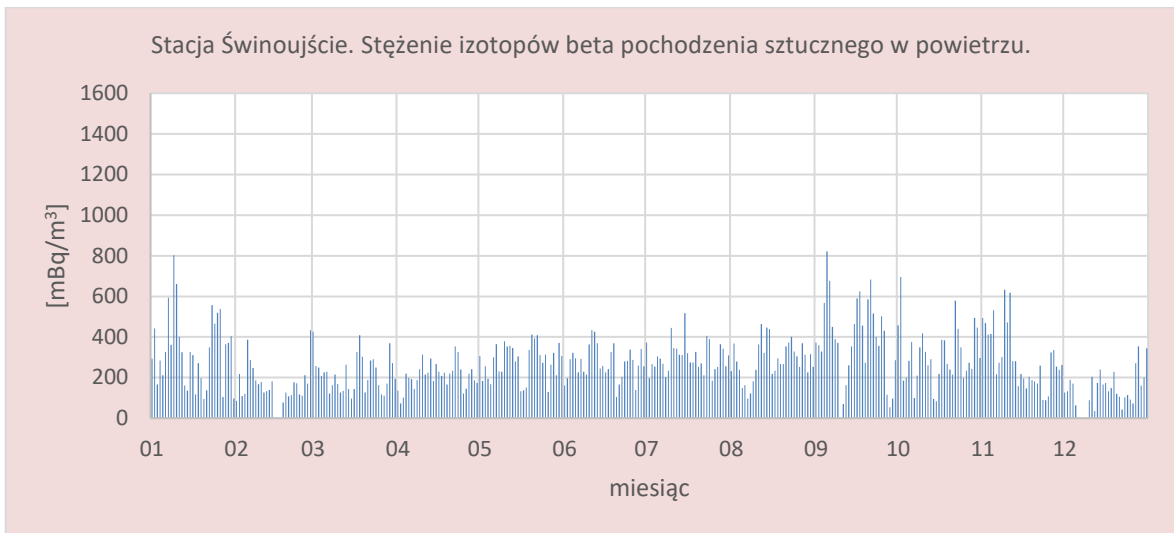
Miesiąc	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	0,007	0,453	0,335	0,513	0,094	0,211	0,148	0,252
Luty	0,005	0,199	0,157	0,122	0,128	0,300	0,112	0,146
Marzec	0,003	0,336	0,217	0,221	0,129	0,330	0,159	0,199
Kwiecień	0,004	0,348	0,209	0,154	0,186	0,309	0,093	0,186
Maj	0,029	0,535	0,281	0,271	0,223	b.d.	0,176	0,252
Czerwiec	0,015	0,513	0,271	0,186	0,237	0,270	0,118	0,230
Lipiec	0,005	0,574	0,301	0,381	0,282	0,444	0,185	0,310
Sierpień	0,011	0,593	0,286	0,467	0,251	0,467	0,169	0,321
Wrzesień	0,016	0,583	0,387	0,377	0,180	0,548	0,143	0,319
Październik	0,009	0,225	0,309	0,385	0,157	0,578	0,282	0,278
Listopad	0,000	0,466	0,294	0,362	0,119	0,368	0,206	0,259
Grudzień	0,000	0,288	0,137	0,275	0,047	0,252	0,077	0,154
Minimalna średnia dawka miesięczna	0,000	0,199	0,137	0,122	0,047	0,211	0,077	0,146
Maksymalna średnia dawka miesięczna	0,029	0,593	0,387	0,513	0,282	0,578	0,282	0,321
Średnia roczna	0,009	0,428	0,266	0,311	0,170	0,381	0,156	0,243



Rys.26. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Mikołajki w 2023 roku



Rys.27. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp. w 2023 roku



Rys.28. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Świnoujście w 2023 roku



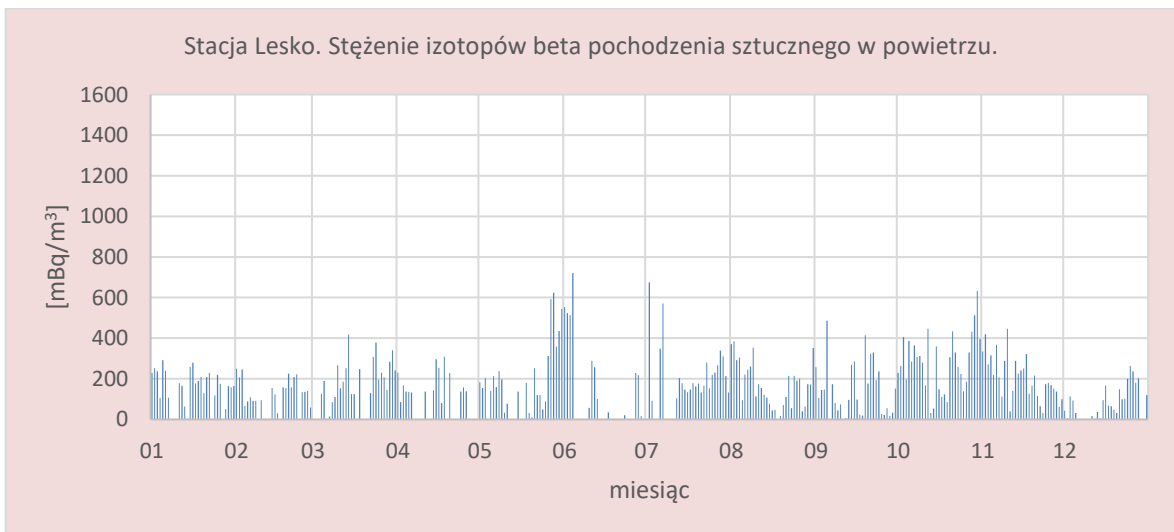
Rys.29. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Legnica w 2023 roku



Rys.30. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Włodawa w 2023 roku



Rys.31. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Zakopane w 2023 roku



Rys.32. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W 2023 roku średnie roczne stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta wyniosło 0,243 Bq/m³ i było niższe niż w roku ubiegłym o 0,207 Bq/m³. Średnie roczne stężenia uzyskane w latach 2015 - 2023 były jednymi z najwyższych spośród wszystkich średnich odnotowanych od 2000 roku. Wartości te są kilkunastokrotnie wyższe niż najmniejsze średnie stężenie przypadające na rok 2001. Należy dodać iż aktywności te uznajemy za niskie, pozostające na poziomie tła i niestanowiące zagrożenia. Średnia aktywność promieniowania beta w aerozolach w badanym okresie wyniosła 0,149 Bq/m³ (Tabela 8).

Tabela 8. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta w latach 2000-2023 [Bq/m³]

Rok	Średnie roczne stężenie	Rok	Średnie roczne stężenie
2000	0,034	2013	0,113
2001	0,017	2014	0,137
2002	0,034	2015	0,241
2003	0,040	2016	0,240
2004	0,035	2017	0,237
2005	0,056	2018	0,229
2006	0,060	2019	0,337
2007	0,048	2020	0,330
2008	0,037	2021	0,274
2009	0,058	2022	0,450
2010	0,076	2023	0,243
2011	0,083	Średnia	0,149
2012	0,160	Minimalna	0,017
		Maksymalna	0,450

3.3. Globalna aktywność beta całkowitego opadu atmosferycznego

3.3.1 Globalna aktywność beta całkowitego opadu dobowego

Całkowitym opadem atmosferycznym (ang. *fallout*) nazywamy całkowity opad mokry i suchy, zawierający cząstki i pyły docierający do powierzchni Ziemi z atmosfery, w którym zawieszono są izotopy promieniotwórcze. Globalna aktywność beta opadu całkowitego wynika z obecności izotopów emitujących promieniowanie beta w opadzie atmosferycznym.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

W 2023 roku maksymalne wartości dobowe zmieniały się w zakresie od 2,0 Bq/m² na stacji pomiarowej w Gdyni do 7,0 Bq/m² w Zakopanem (Tabela 9, Rys 33-41). Otrzymane wyniki nie odbiegają znacznie od wartości uzyskanych w roku poprzednim. Minimalne dobowe stężenia izotopów beta promieniotwórczych w próbkach całkowitego opadu dobowego na wszystkich stacjach pomiarowych przyjmowały wartości na poziomie zera, a średnia suma dobowo dla całego roku (326 Bq/m²) (Tabela 9a) była nieznacznie wyższa niż średnia z 2022 roku (320 Bq/m²).

Miesięczne średnie aktywności beta wyznaczone na podstawie pomiarów dobowych zmieniały się w dość wąskim zakresie. Podobnie jak w ubiegłym roku najniższe wartości odnotowano na stacji w Gdyni, gdzie średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów beta wahały się od 0,1 Bq/m² do 0,4 Bq/m², oraz w Gorzów Wlkp. (od 0,4 Bq/m² do 0,9 Bq/m²) i Świnoujściu (od 0,5 Bq/m² do 0,8 Bq/m²). Najwyższe

średnie miesięczne wystąpiły zaś w Mikołajkach, gdzie mieściły się w przedziale od 1,0 Bq/m² do 1,4 Bq/m² oraz Legnicy i Zakopanem, gdzie mieściły się w przedziale od 0,9 Bq/m² do 1,5 Bq/m².

Porównując średnie wartości roczne wyznaczone na podstawie danych dobowych w 2023 roku wynika, że najniższy dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta (0,3 Bq/m²) charakteryzował okolice Gdyni, co może mieć związek z częstszymi i bardziej intensywnymi wiatrami występującymi w strefie nadmorskiej. Najwyższe średnie roczne aktywności beta (od 1,1 Bq/m² do 1,2 Bq/m²) charakteryzowały stację w Mikołajkach, Legnicy, Włodawie i Zakopanem.

Średnie stężenia promieniotwórcze izotopów beta w poszczególnych miesiącach charakterystyczne dla obszaru całej Polski (wyznaczone z wyników dobowych uzyskanych na wszystkich stacjach) zmieniały się w bardzo wąskim zakresie od 0,8 Bq/m² (w styczniu, wrześniu i listopadzie) do 1,1 Bq/m², wartości odnotowanej w sierpniu. Średnia roczna (326 Bq/m²) dla wszystkich stacji w 2023 roku była wyższa od średniej rocznej uzyskanej w poprzednim roku (320 Bq/m²).

Najwyższe wartości dobowe mają związek z intensywnymi opadami deszczu. Wysokość opadu atmosferycznego w sierpniu na wszystkich stacjach wyniosła łącznie 1071,7 mm i była najwyższa spośród wszystkich miesięcy. W Zakopanem 5 sierpnia spadło 28,9 mm deszczu, czego efektem był całkowity opad dobowy o wartości 7 Bq/m². Tego samego dnia w Mikołajkach spadło 25,2 mm deszczu, a opad całkowity dobowy wyniósł 4 Bq/m². Podobnie, opady deszczu w Legnicy i Włodawie spowodowały, że aktywność beta opadu całkowitego w tych miastach osiągała 5 Bq/m². Wysokie wartości w przypadku braku opadu deszczu mogą mieć związek z erupcjami wulkanicznymi w Europie oraz długimi okresami bezdeszczowymi w Polsce.

Tabela 9. Średnie miesięczne stężenia izotopów beta w dobowym opadzie całkowitym w 2023 roku [Bq/m²]

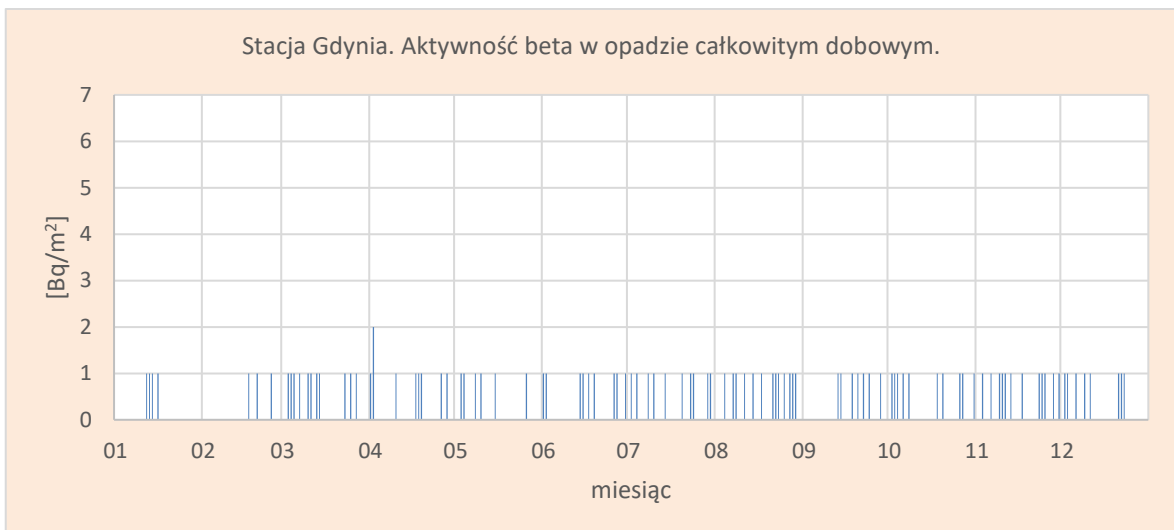
Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	1,0	0,1	1,1	0,5	0,6	0,9	1,1	0,9	0,9	0,8
Luty	0,8	0,1	1,4	0,8	0,5	1,0	1,2	1,3	0,9	0,9
Marzec	0,8	0,4	1,1	0,7	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	0,9
Kwiecień	1,0	0,3	1,1	0,7	0,7	1,0	1,1	1,2	0,9	0,9
Maj	0,8	0,2	1,1	0,6	0,6	1,1	1,2	1,2	1,0	0,9
Czerwiec	0,9	0,3	1,1	0,7	0,8	1,0	1,2	1,2	1,1	0,9
Lipiec	0,9	0,3	1,0	0,7	0,8	1,1	1,1	1,3	1,2	0,9
Sierpień	1,0	0,4	1,3	0,9	0,8	1,5	1,2	1,5	1,0	1,1
Wrzesień	0,9	0,2	1,1	0,4	0,8	0,9	0,9	1,3	1,1	0,8
Październik	1,0	0,3	1,2	0,5	0,8	1,1	1,0	1,3	1,1	0,9
Listopad	0,9	0,4	1,0	0,5	0,6	1,0	0,9	1,2	1,1	0,8
Grudzień	1,1	0,3	1,1	0,4	0,8	1,0	0,8	1,2	1,2	0,9
Minimalna średnia dawka miesięczna	0,8	0,1	1,0	0,4	0,5	0,9	0,8	0,9	0,9	0,7
Maksymalna średnia dawka miesięczna	1,1	0,4	1,4	0,9	0,8	1,5	1,2	1,5	1,2	1,1
Minimalna wartość dobową	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Maksymalna wartość dobową	3	2	6	4	4	5	5	7	3	4,3
Średnia roczna	0,9	0,3	1,1	0,6	0,7	1,1	1,1	1,2	1,0	0,9

Tabela 9a. Roczna wartość stężenia izotopów beta uzyskana jako suma wszystkich wartości dobowych opadu całkowitego w roku 2023 [Bq/m²]

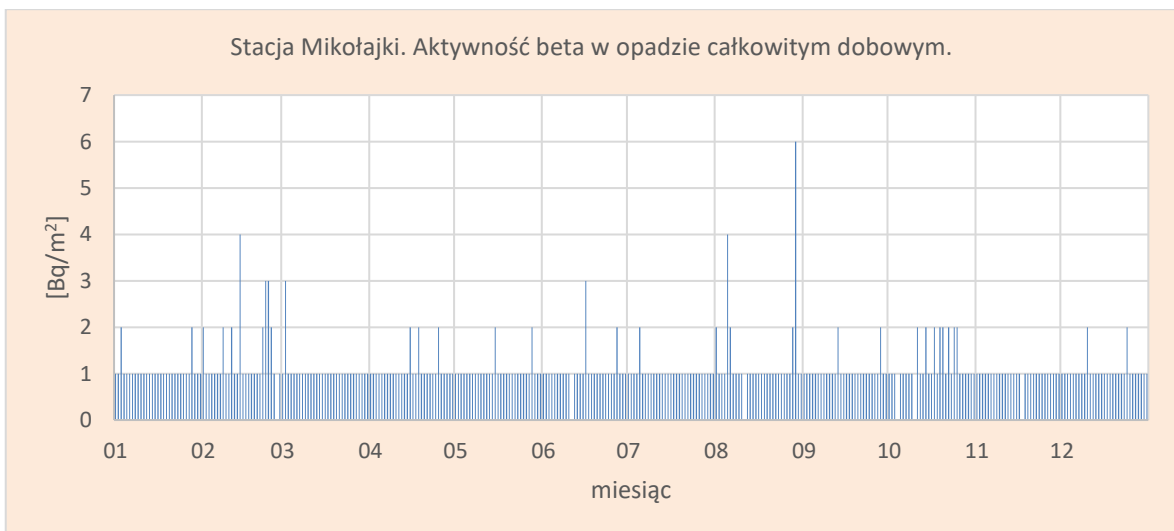
Stacja	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Śr. suma roczna
Suma roczna	342	102	407	225	254	388	386	454	376	326



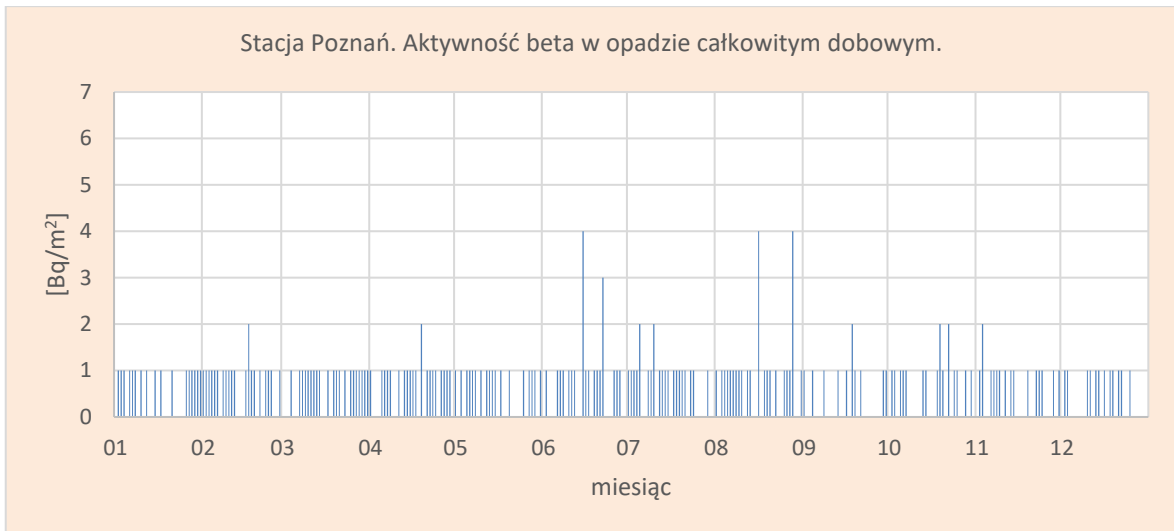
Rys.33. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Warszawa w 2023 roku



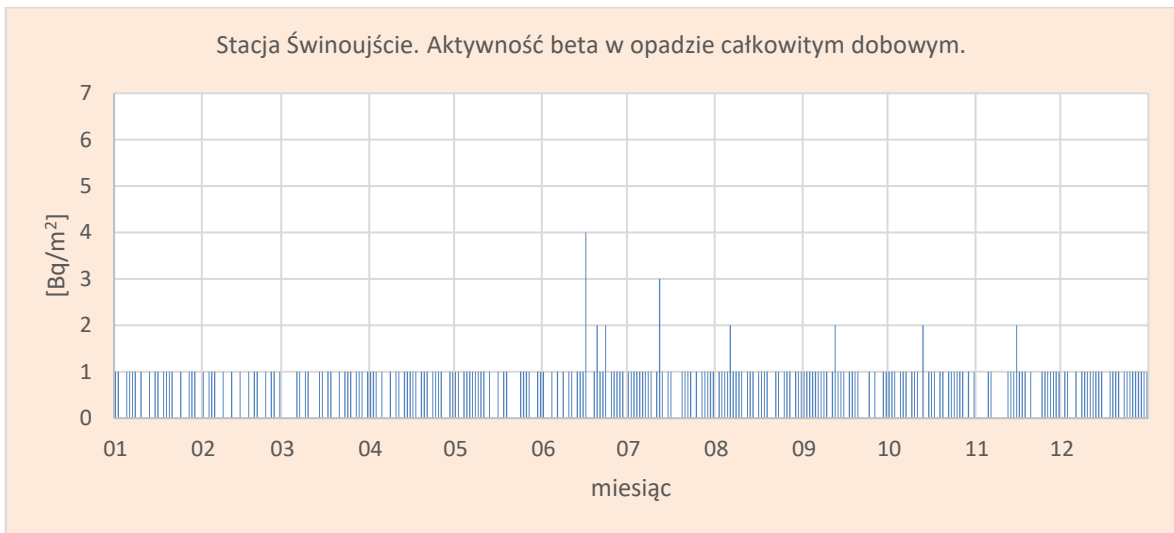
Rys.34. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Gdynia w 2023 roku



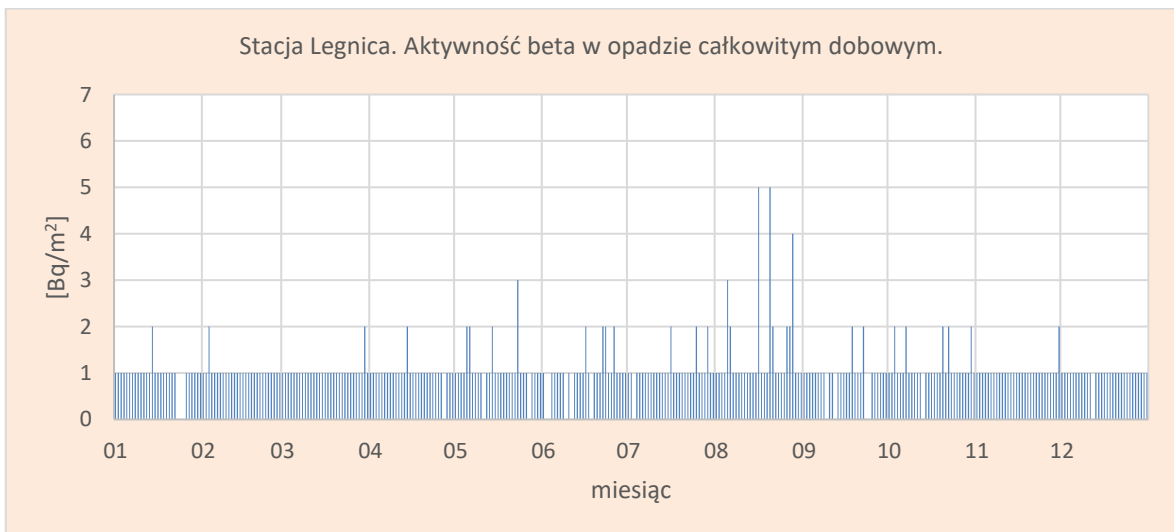
Rys.35. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Mikołajki w 2023 roku



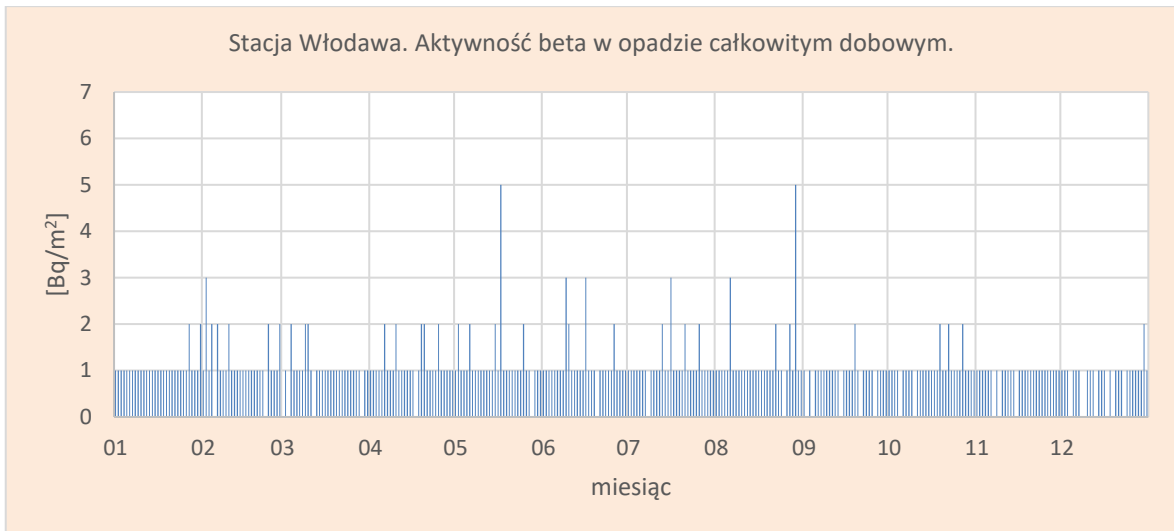
Rys.36. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Poznań w 2023 roku.



Rys.37. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Świnoujście 2023 roku



Rys.38. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Legnica w 2023 roku



Rys.39. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Włodawa w 2023 roku



Rys.40. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Zakopane w 2023 roku



Rys.41. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Lesko w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Sumaryczna aktywność beta dla całego obszaru Polski, opisująca dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta do powierzchni Ziemi, obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wyznaczonych stacjach w 2023 roku (0,33 kBq/m²/rok) była taka sama jak w latach: 2000, 2009, 2010, 2011, 2017 i 2018. Wartość średnia obliczona dla okresu 2000-2023 utrzymuje się na poziomie 0,32 kBq/m²/rok (Tabela 10).

Tabela 10. Średnia sumaryczna aktywność beta całkowitego opadu dobowego dla sieci 9 stacji w latach 2000- 2023 [kBq/m²/rok]

Rok	Sumaryczna aktywność beta	Rok	Sumaryczna aktywność beta
2000	0,33	2013	0,31
2001	0,34	2014	0,32
2002	0,34	2015	0,31
2003	0,32	2016	0,31
2004	0,34	2017	0,33
2005	0,32	2018	0,33
2006	0,31	2019	0,31
2007	0,31	2020	0,31
2008	0,30	2021	0,32
2009	0,33	2022	0,32
2010	0,33	2023	0,33
2011	0,33	Średnia	0,32
2012	0,32	Minimalna	0,30
		Maksymalna	0,34

3.3.2 Globalna aktywność beta wody opadowej

Globalną aktywność beta wody opadowej określa się jako aktywność izotopów emitujących promieniowanie beta w całkowitym opadzie dobowym odniesioną do objętości wody opadowej. Globalna aktywność beta wody opadowej obliczana jest na podstawie aktywności beta dobowych próbek opadu całkowitego tylko wtedy, gdy wysokość opadu danego dnia jest równa lub przekracza 1 mm.

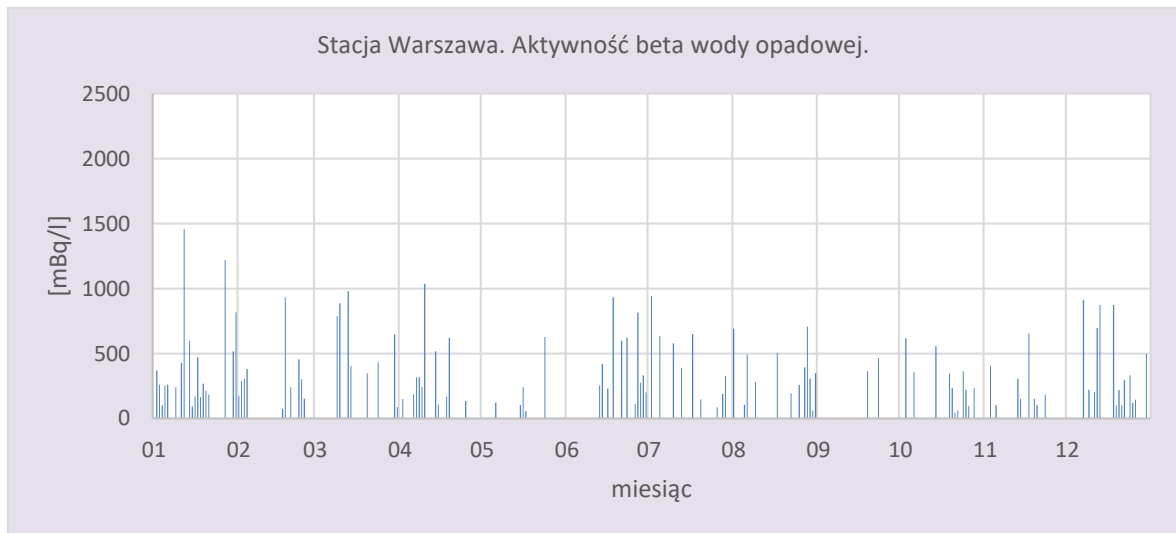
Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

W 2023 roku tylko w Gdyni zarejestrowane maksymalne wartości dobowej globalnej aktywności beta wody opadowej nie przekraczały 1000 mBq/l (Tabela 11, Rys. 42-50). Maksymalna wartość dobową wyniosła 2458 mBq/l i wystąpiła we Włodawie. Minimalne dobowe wartości zmieniały się w stosunkowo szerokim zakresie od 5 mBq/l w Gdyni do 58 mBq/l w Legnicy i we Włodawie.

Maksymalne średnie miesięczne wartości dobowej globalnej aktywności beta wody opadowej mieściły się w granicy od 256,7 mBq/l w styczniu na stacji Gdynia do 708,3 mBq/l w marcu na stacji Zakopane. Minimalne średnie miesięczne wartości zmieniały się od 52,3 mBq/l w czerwcu w Gdyni do 267,3 mBq/l w maju we Włodawie. Średnia roczna aktywność dla poszczególnych stacji mieściła się w przedziale od 179,0 mBq/l (Gdynia) do 407,6 mBq/l (Włodawa).

Tabela 11. Średnie miesięczne wartości aktywności beta wody opadowej w 2023 roku [mBq/l]

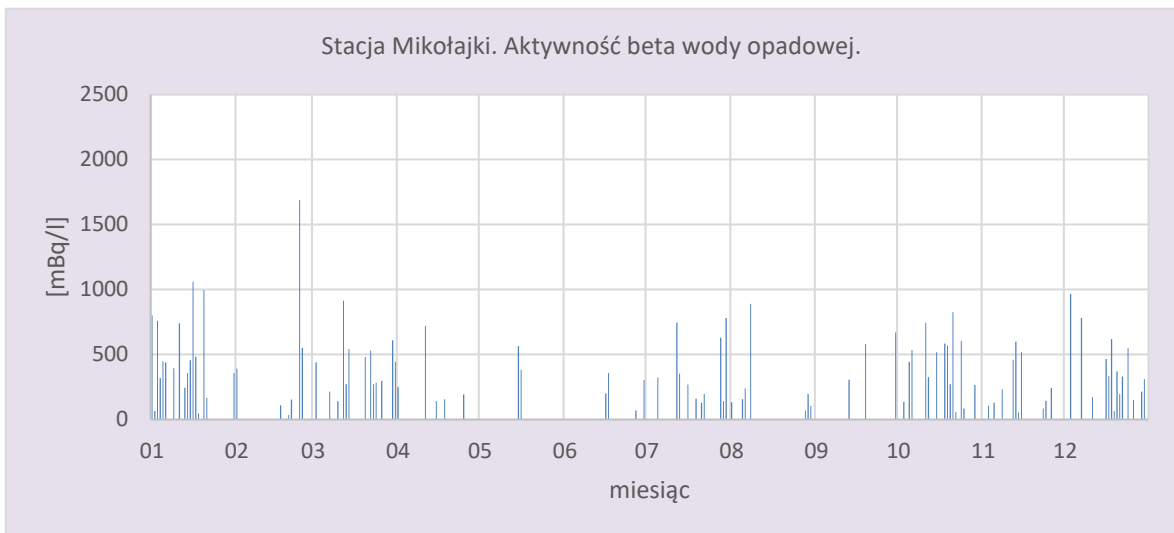
Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	425,4	256,7	478,5	259,7	226,4	467,3	460,8	360,1	293,1	358,7
Luty	330,9	196,3	488,0	288,9	194,5	321,8	639,6	388,3	306,4	350,5
Marzec	571,4	215,2	418,5	354,2	201,3	302,7	449,7	708,3	318,8	393,3
Kwiecień	345,5	181,8	291,8	268,6	199,5	395,5	464,6	348,2	356,4	316,9
Maj	230,0	210,5	474,5	351,0	200,0	354,2	267,3	218,3	298,9	289,4
Czerwiec	435,7	52,3	232,8	273,0	156,1	367,8	375,9	202,5	333,3	269,9
Lipiec	438,1	181,2	373,1	291,1	238,5	390,3	384,7	305,9	219,9	313,7
Sierpień	362,1	135,1	255,1	291,3	240,2	258,8	298,6	211,4	299,5	261,3
Wrzesień	413,5	190,0	519,7	86,0	232,0	447,8	528,5	381,3	272,1	341,2
Październik	284,6	121,5	425,7	187,0	333,8	369,3	363,4	307,4	249,9	293,6
Listopad	257,5	165,4	257,0	164,8	297,6	275,0	322,4	393,6	398,8	281,3
Grudzień	399,3	168,8	394,8	80,3	371,6	369,2	344,1	492,9	313,6	326,1
Minimalna średnia dawka miesięczna	230,0	52,3	232,8	80,3	156,1	258,8	267,3	202,5	219,9	188,9
Maksymalna średnia dawka miesięczna	571,4	256,7	519,7	354,2	371,6	467,3	639,6	708,3	398,8	476,4
Minimalna wartość dobowa	43	5	35	14	15	58	58	31	49	34,2
Maksymalna wartość dobowa	1457	940	1688	886	1189	1153	2458	1779	1962	1501,3
Średnia roczna	380,0	179,0	390,2	250,4	257,7	355,8	407,6	347,4	311,3	319,0



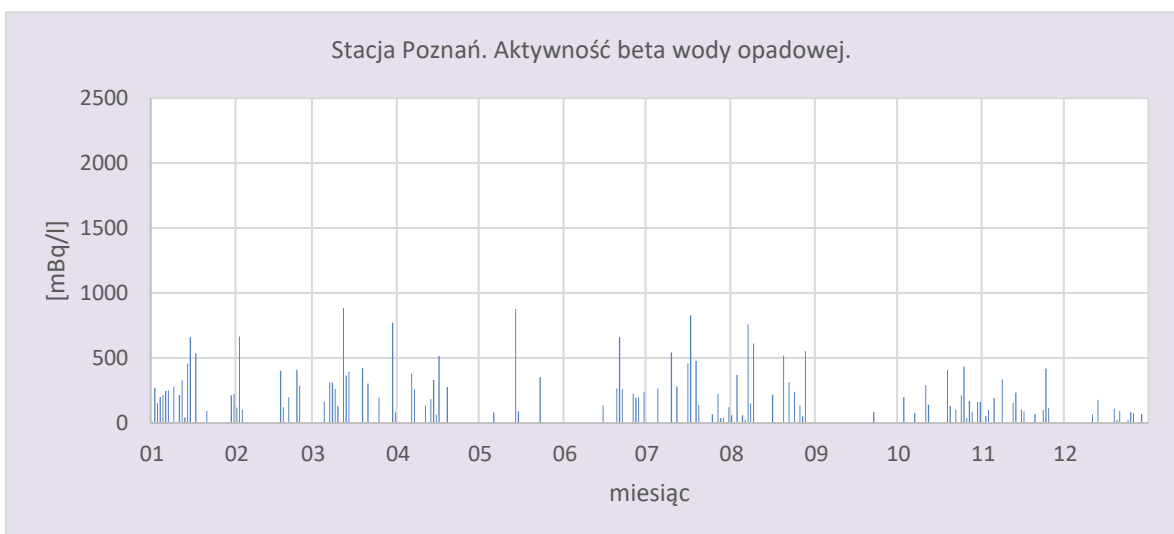
Rys.42. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Warszawa w 2023 roku



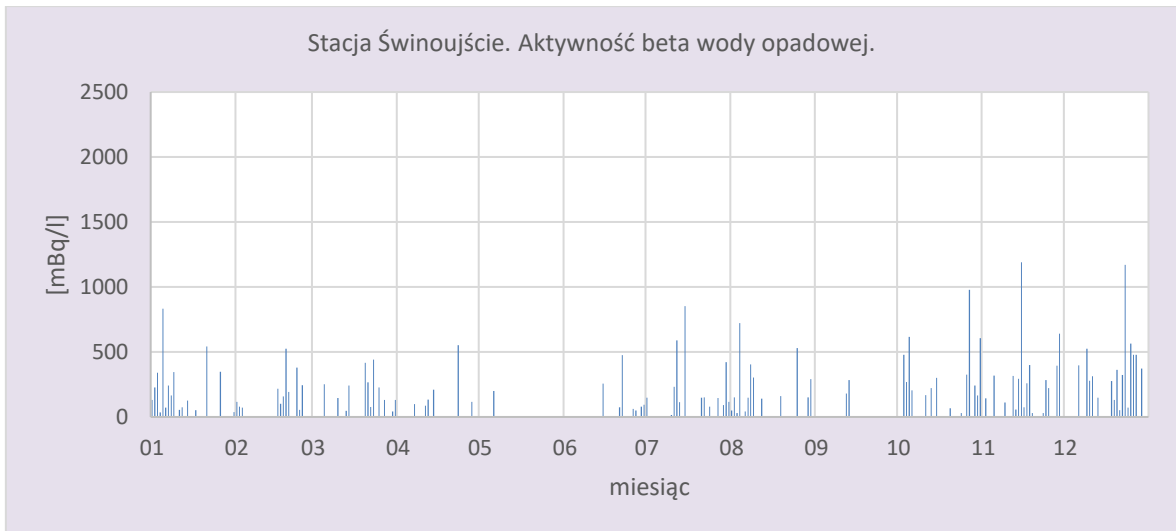
Rys.43. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Gdynia w 2023 roku



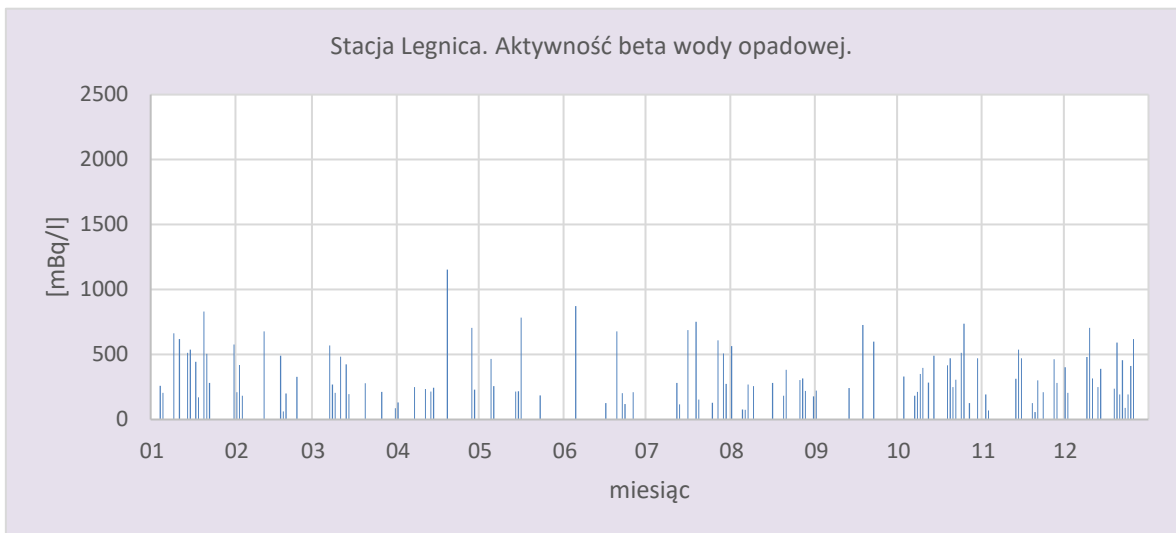
Rys.44. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Mikołajki w 2023 roku



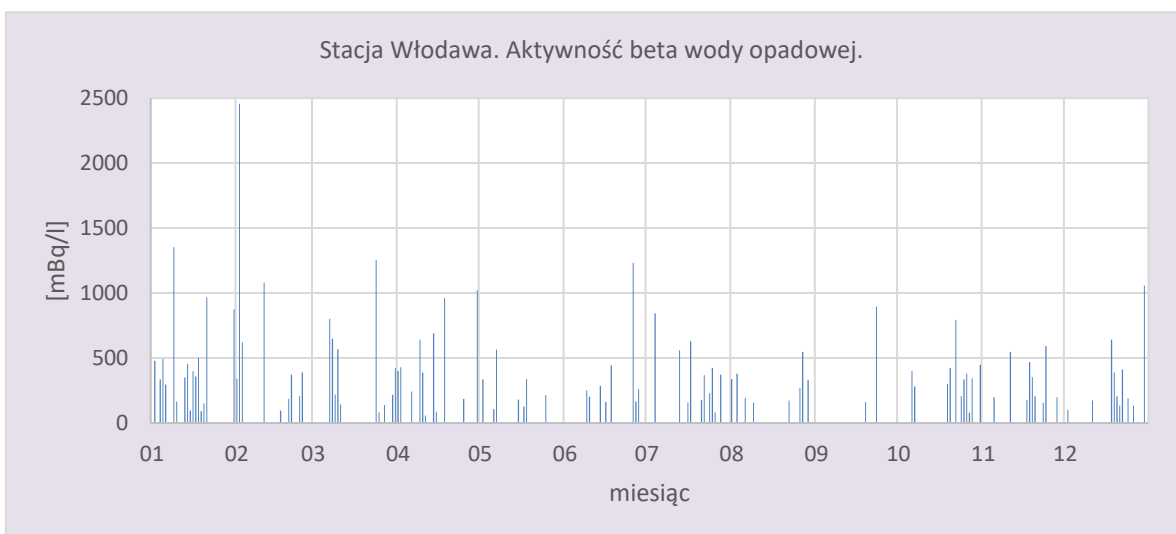
Rys.45. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Poznań w 2023 roku



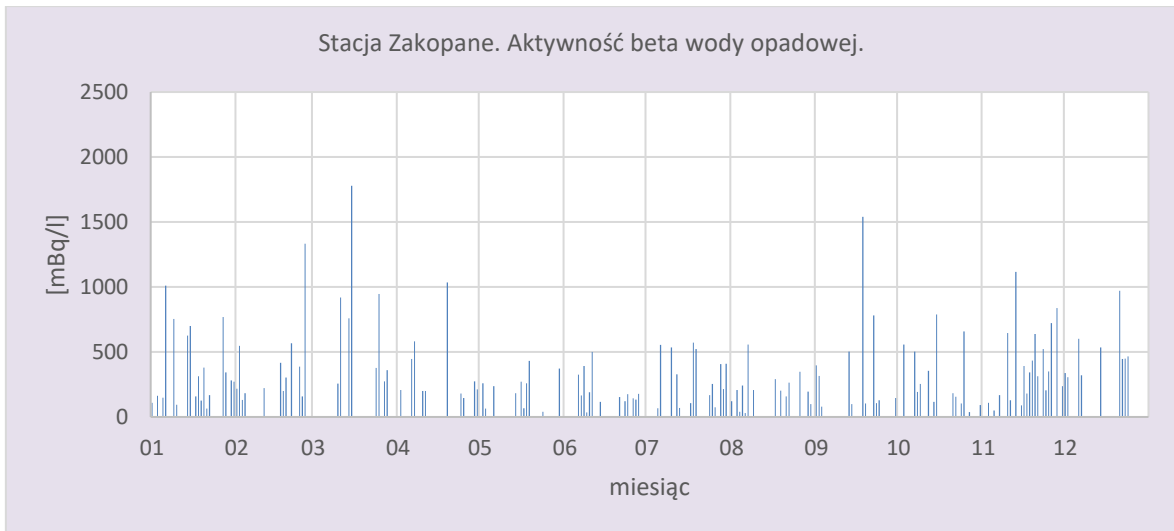
Rys.46. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Świnoujście w 2023 roku



Rys.47. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Legnica w 2023 roku



Rys.48. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Włodawa w 2023 roku



Rys.49. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Zakopane w 2023 roku



Rys.50. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Lesko w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnia aktywność beta wody opadowej w 2023 roku wyniosła 319 mBq/l (Tabela 12). Maksymalna wartość, jaka wystąpiła w okresie 2000-2023, przypada na rok 2003 (376 mBq/l). Średnia aktywność beta wody opadowej w omawianym okresie utrzymuje się na poziomie 337 mBq/l.

Tabela 12. Średnie aktywności beta wody opadowej w latach 2000-2023 [mBq/l]

Rok	Aktywność beta	Rok	Aktywność beta
2000	352	2013	315
2001	371	2014	311
2002	348	2015	350
2003	376	2016	324
2004	374	2017	316
2005	358	2018	335
2006	346	2019	298
2007	333	2020	288
2008	338	2021	329
2009	345	2022	342
2010	328	2023	319
2011	352	Średnia	337
2012	342	Minimalna	288
		Maksymalna	376

3.3.3 Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego

Całkowita aktywność promieniowania beta w opadzie miesięcznym związana jest, podobnie jak ma to miejsce w przypadku całkowitej aktywności opadu dobowego, z obecnością izotopów emitujących promieniowanie beta w próbkach opadu atmosferycznego.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

Średnia aktywność promieniowania beta w Polsce w próbkach opadu całkowitego wynosiła 7,9 Bq/m² i oscylowała w szerokim zakresie (2-27 Bq/m²) (Tabela 13). Najniższe średnie aktywności promieniowania beta w opadzie całkowitym odnotowano na stacjach w Mikołajkach (4,3 Bq/m²), w Świnoujściu (4,7 Bq/m²) i były one odpowiednio o 45,6% i 40,5% niższe od średniej ze wszystkich stacji (Rys. 51-59). Na pozostałych stacjach średnia aktywność promieniowania beta zmieniała się w przedziale od 6,6 Bq/m² na stacji w Gdyni do 11,9 Bq/m² w Zakopanem.

Tabela 13. Zestawienie wyników aktywności beta zbiorczych próbek miesięcznego opadu całkowitego w roku 2023 [Bq/m²]

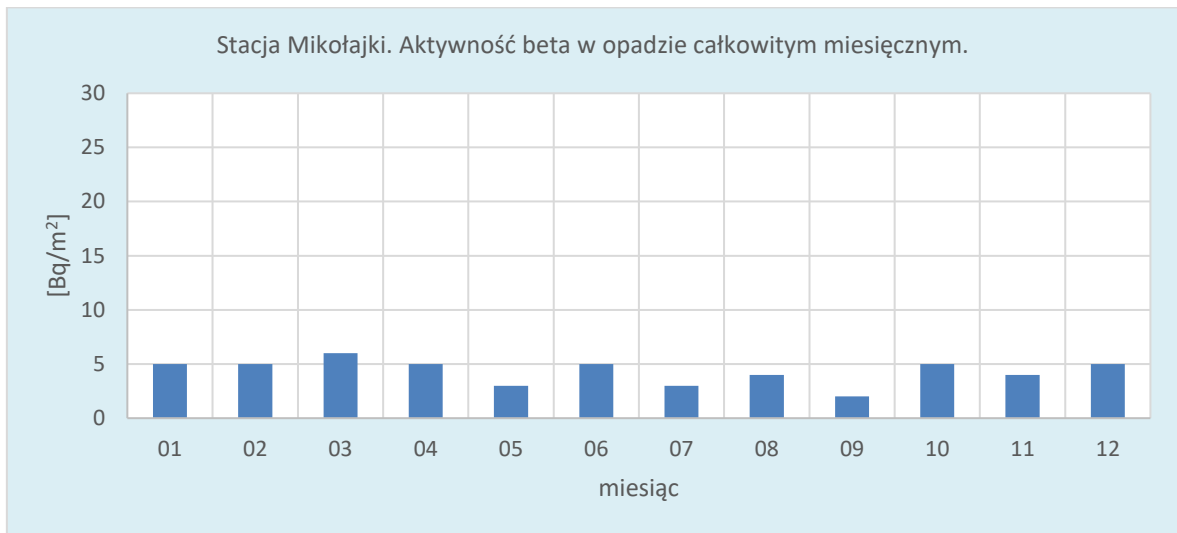
Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Poznań	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko
Styczeń	10	6	5	6	3	6	4	9	11
Luty	6	5	5	6	2	7	6	12	6
Marzec	8	6	6	6	4	4	5	9	6
Kwiecień	12	7	5	7	3	5	7	2	7
Maj	11	7	3	7	5	8	16	12	10
Czerwiec	10	10	5	16	10	8	13	14	11
Lipiec	10	7	3	11	6	9	12	19	13
Sierpień	12	10	4	13	6	15	14	27	14
Wrzesień	7	7	2	8	4	4	7	17	15
Październik	16	7	5	8	5	8	7	8	6
Listopad	13	4	4	5	5	5	6	9	5
Grudzień	12	3	5	6	2	4	2	5	7
Średnia	10,6	6,6	4,3	8,3	4,6	6,9	8,3	11,9	9,3
Minimalna	6	3	2	5	2	4	2	2	5
Maksymalna	16	10	6	16	10	15	16	27	15
Wartość średnia	7,9								
Wartość minimalna	2								
Wartość maksymalna	27								



Rys.51. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Warszawa w 2023 roku



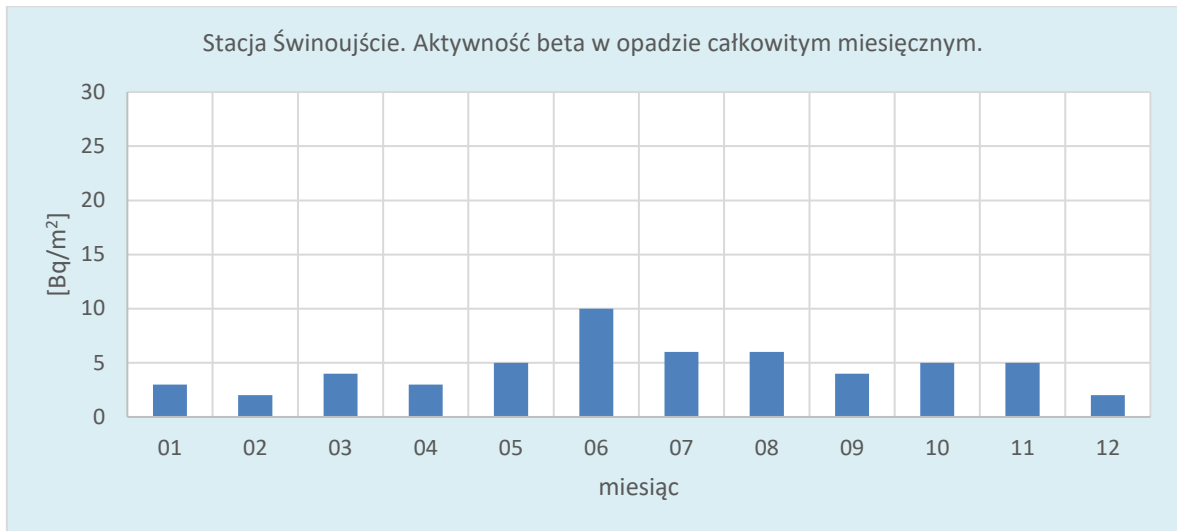
Rys.52. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Gdynia w 2023 roku



Rys.53. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Mikołajki w 2023 roku



Rys.54. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Poznań w 2023 roku.



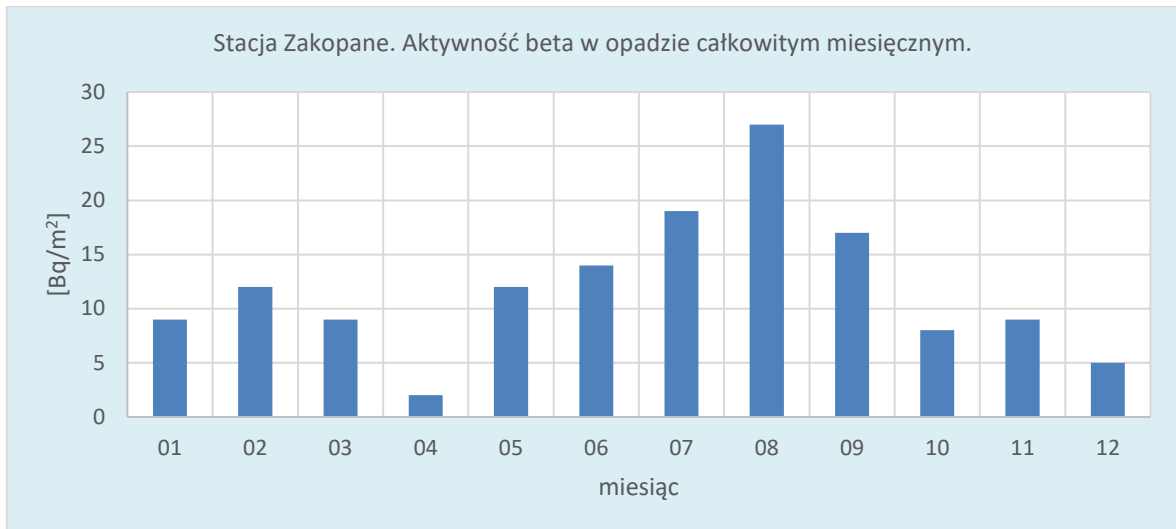
Rys.55. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Świnoujście w 2023 roku



Rys.56. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Legnica w 2023 roku



Rys.57. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Włodawa w 2023 roku



Rys.58. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Zakopane w 2023 roku



Rys.59. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Lesko w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnia aktywność promieniowania beta w całkowitym miesięcznym opadzie w roku 2023 wynosiła 7,9 Bq/m² i była o 0,9 Bq/m² wyższa od średniorocznej aktywności w roku ubiegłym. W latach 2000-2023 najniższą wartość uzyskano w roku 2005 (6,0 Bq/m²), najwyższą zaś w roku 2017 (8,7 Bq/m²). Średnia aktywność tego promieniowania w całkowitym opadzie miesięcznym w omawianym okresie wynosiła 7,3 Bq/m² (Tabela 14).

Tabela 14. Średnie wartości aktywności beta całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2023 [Bq/m²]

Rok	Średnia radioaktywność beta opadu miesięcznego	Rok	Średnia radioaktywność beta opadu miesięcznego
2000	6,1	2013	7,3
2001	7,1	2014	8,0
2002	6,7	2015	7,5
2003	6,6	2016	7,8
2004	6,4	2017	8,7
2005	6,0	2018	8,4
2006	6,2	2019	7,4
2007	6,5	2020	7,2
2008	6,4	2021	8,0
2009	7,8	2022	7,0
2010	8,2	2023	7,9
2011	8,0	Średnia	7,3
2012	7,3	Minimalna	6,0
		Maksymalna	8,7

3.4 Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs i ¹³⁴Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego

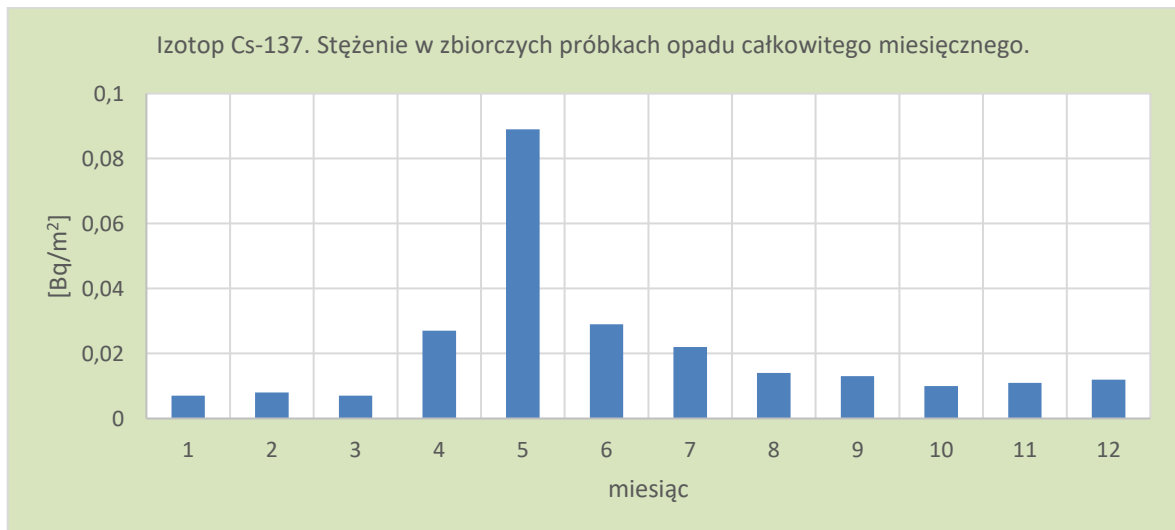
Promieniotwórcze izotopy cezu są izotopami pochodzenia antropogenicznego o stosunkowo długim okresie połowicznego rozpadu (30,05 lat) w przypadku ¹³⁷Cs i zdecydowanie krótszym (2,07 lat) w przypadku ¹³⁴Cs. Ich stężenia promieniotwórcze (aktywność odniesiona do powierzchni) oznaczane są w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego pochodzących z 9 stacji i mogą zostać uznane za reprezentatywne dla całego obszaru Polski.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

Średni ładunek ¹³⁷Cs wraz z opadem atmosferycznym wynosił 0,021 Bq/m², w przypadku ¹³⁴Cs stężenia tego izotopu były poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej. Najniższe ładunki ¹³⁷Cs notowane były w styczniu i marcu (0,007 Bq/m²) oraz w lutym (0,008 Bq/m²), najwyższy zaś w maju (0,089 Bq/m²) (Tabela 15, Rys. 60).

Tabela 15. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{134}Cs w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2023 r. [Bq/m^2]

Miesiąc	Aktywność Cs-137		Aktywność Cs-134
	Aktywność	Błąd pomiarowy	
Styczeń	0,007	0,001	< 0,003
Luty	0,008	0,002	< 0,003
Marzec	0,007	0,002	< 0,004
Kwiecień	0,027	0,002	< 0,003
Maj	0,089	0,003	< 0,003
Czerwiec	0,029	0,003	< 0,005
Lipiec	0,022	0,002	< 0,004
Sierpień	0,014	0,002	< 0,004
Wrzesień	0,013	0,002	< 0,004
Październik	0,010	0,002	< 0,004
Listopad	0,011	0,002	< 0,004
Grudzień	0,012	0,002	< 0,004
Suma roczna	0,249		
Średnia	0,021		
Minimalna	0,007		
Maksymalna	0,089		



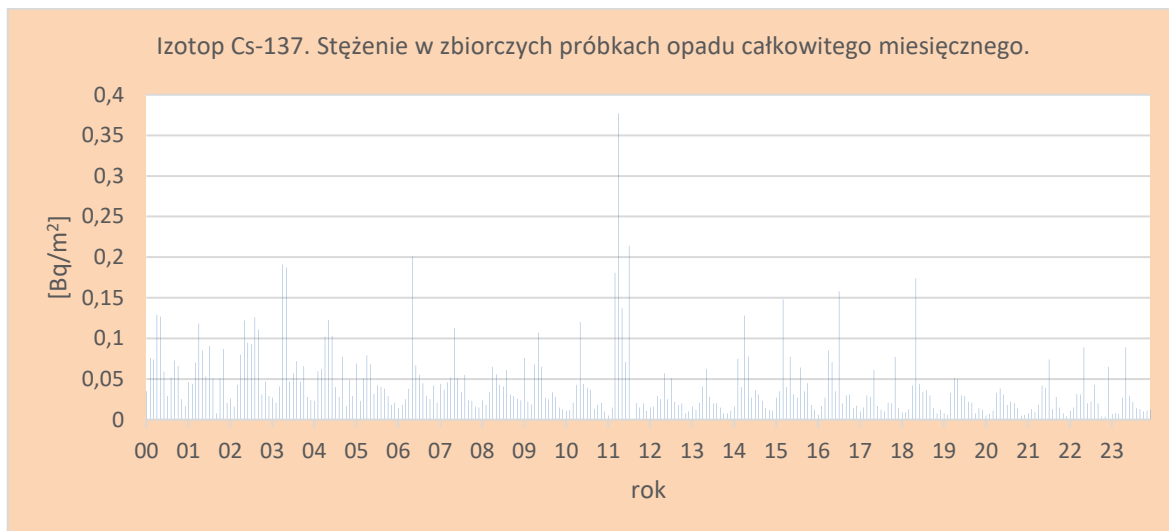
Rys.60. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w roku 2023

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

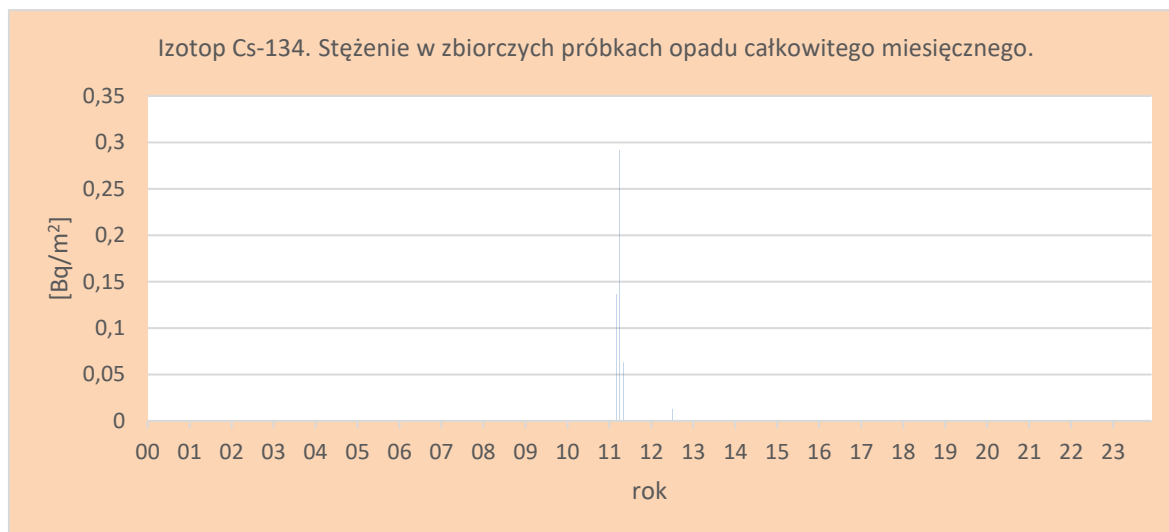
Izotop ^{137}Cs charakteryzuje się niską prędkością opadania (0,05 – 0,5 cm/s), dlatego ładunek tego izotopu docierający do powierzchni Ziemi wzrasta w okresach intensywnych opadów, które powodują wypłukiwanie tego pierwiastka z atmosfery. W związku z tym najczęściej największy dopływ ^{137}Cs do powierzchni Ziemi występuje w okresie wiosenno-letnim, kiedy miesięczne sumy opadów są największe (Rys. 61). Roczna suma dopływu ^{137}Cs w 2023 roku wynosiła 0,249 Bq/m^2 i była o 0,107 niższa od wartości z 2022 (0,356 Bq/m^2), a jednocześnie 4 razy mniejsza od wartości uzyskanej

2011 ($1,067 \text{ Bq/m}^2$), kiedy odnotowano podwyższoną depozycję na skutek awarii elektrowni atomowej w Fukushima (Tabela 16, Rys. 63). Sumaryczny dopływ ^{137}Cs w 2023 roku jest jednym z najniższych spośród wszystkich wyników otrzymanych w badanych latach. Średnia suma rocznych dopływów ^{137}Cs dla okresu 2000-2023 wynosiła $0,503 \text{ Bq/m}^2$ (Tabela 16).

W przypadku izotopu ^{134}Cs tylko w latach 2011 i 2012 określono jego dopływ, w pozostałych latach jego stężenia nie przekraczały limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej (Rys. 62). Od 2000 roku oprócz incydentu w Fukushima nie zanotowano obecności ^{134}Cs w powietrzu.



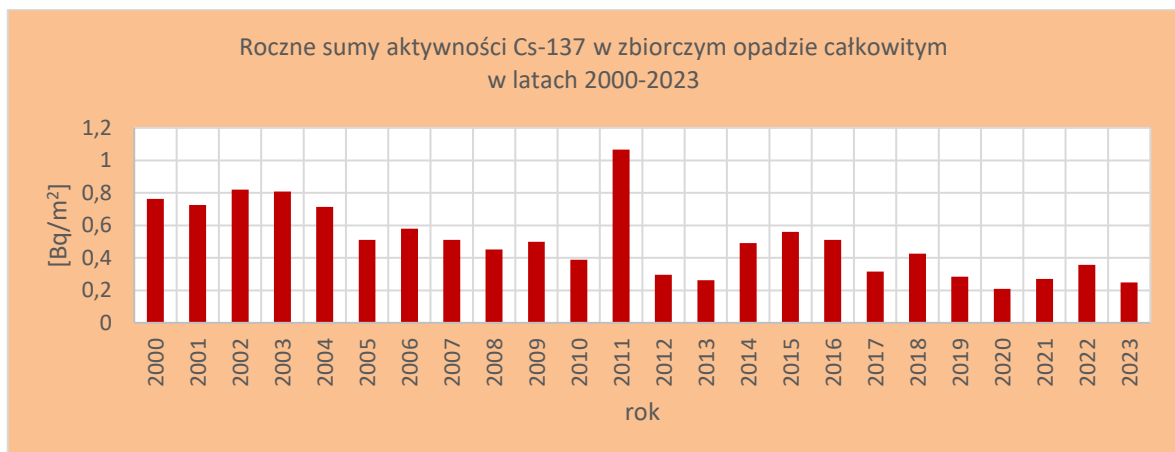
Rys.61. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2023



Rys.62. Stężenie promieniotwórcze ^{134}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2023

Tabela 16. Roczna suma dopływu ^{137}Cs i ^{134}Cs w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2023 [Bq/m^2]

Rok	^{137}Cs	^{134}Cs	Rok	^{137}Cs	^{134}Cs
2000	0,762		2013	0,262	
2001	0,725		2014	0,491	
2002	0,819		2015	0,559	
2003	0,808		2016	0,511	
2004	0,713		2017	0,315	
2005	0,510		2018	0,425	
2006	0,580		2019	0,284	
2007	0,510		2020	0,21	
2008	0,452		2021	0,271	
2009	0,499		2022	0,356	
2010	0,389		2023	0,249	
2011	1,067	0,492	Średnia	0,503	
2012	0,296	0,013	Minimalna	0,210	
			Maksymalna	1,067	



Rys.63. Roczne sumy dopływu ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2023

3.5 Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego

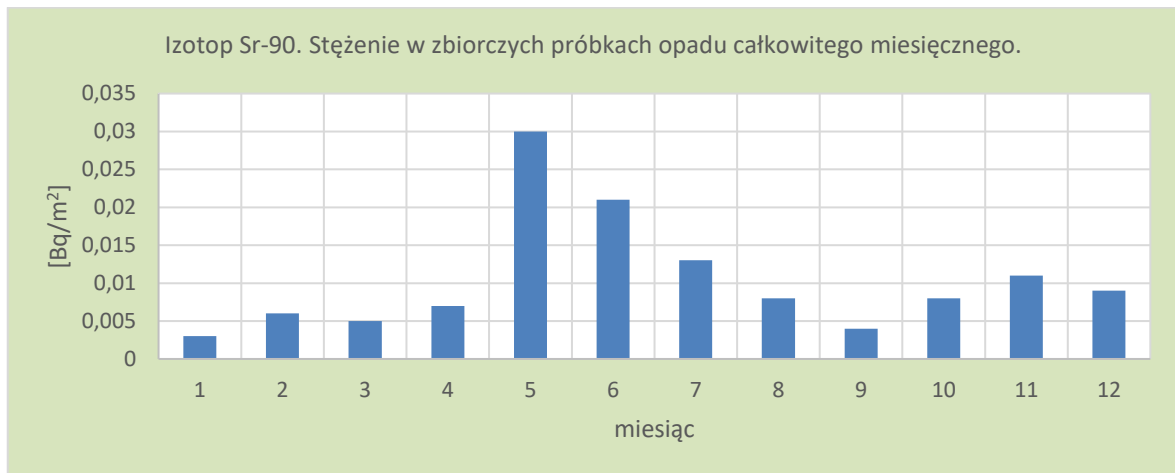
W tych samych zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego, w których analizowano izotopy cezu ^{137}Cs i ^{134}Cs przeprowadzono w 2023 roku pomiary stężeń promieniotwórczych antropogenicznego izotopu strontu – ^{90}Sr , który podobnie jak ^{137}Cs charakteryzuje się stosunkowo długim okresem połowicznego rozpadu (28 lat).

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

Najwyższe stężenie ^{90}Sr zarejestrowano w maju ($0,030 \text{ Bq}/\text{m}^2$) i czerwcu ($0,021 \text{ Bq}/\text{m}^2$). Najniższą aktywność stwierdzono w styczniu ($0,003 \text{ Bq}/\text{m}^2$). Pozostałe stężenia promieniotwórcze w kolejnych miesiącach mieściły się w przedziale od $0,004 \text{ Bq}/\text{m}^2$ do $0,013 \text{ Bq}/\text{m}^2$. Izotop ten charakteryzuje się 4 razy większym tempem opadania niż izotop ^{137}Cs w związku z czym zarówno sucha, jak i mokra depozycja odpowiada za dopływ ^{90}Sr do powierzchni Ziemi, co powoduje, że nie obserwuje się znaczących zmienności w ciągu roku (Tabela 17, Rys. 64).

Tabela 17. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2023 r. [Bq/m^2]

Miesiąc	Aktywność Sr-90	Błąd pomiarowy
Styczeń	0,003	0,001
Luty	0,006	0,001
Marzec	0,005	0,001
Kwiecień	0,007	0,001
Maj	0,030	0,002
Czerwiec	0,021	0,002
Lipiec	0,013	0,001
Sierpień	0,008	0,001
Wrzesień	0,004	0,001
Październik	0,008	0,001
Listopad	0,011	0,001
Grudzień	0,009	0,001
Suma roczna	0,125	
Średnia	0,010	
Minimalna	0,003	
Maksymalna	0,030	



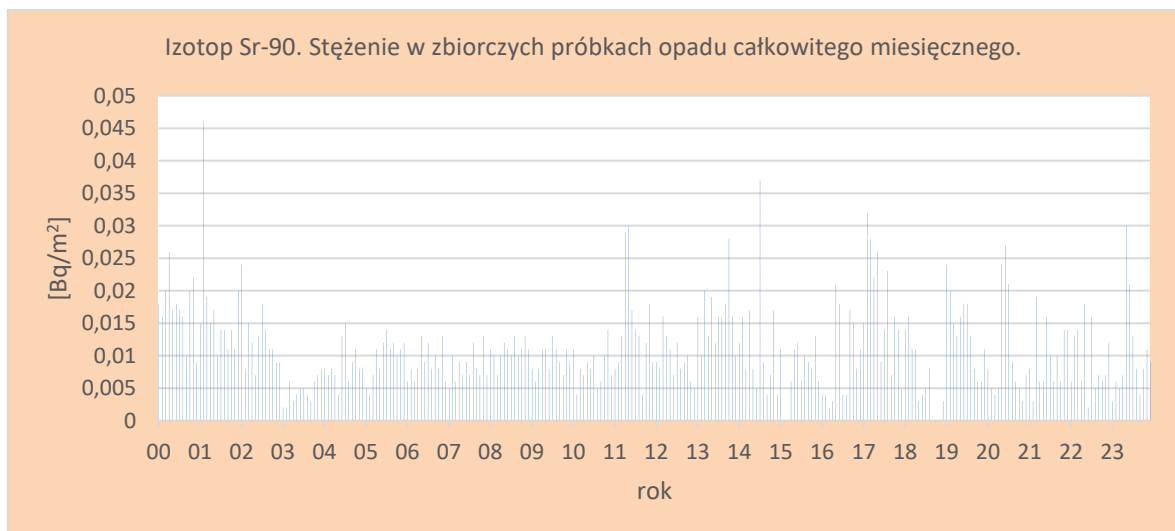
Rys.64. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2023 roku

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

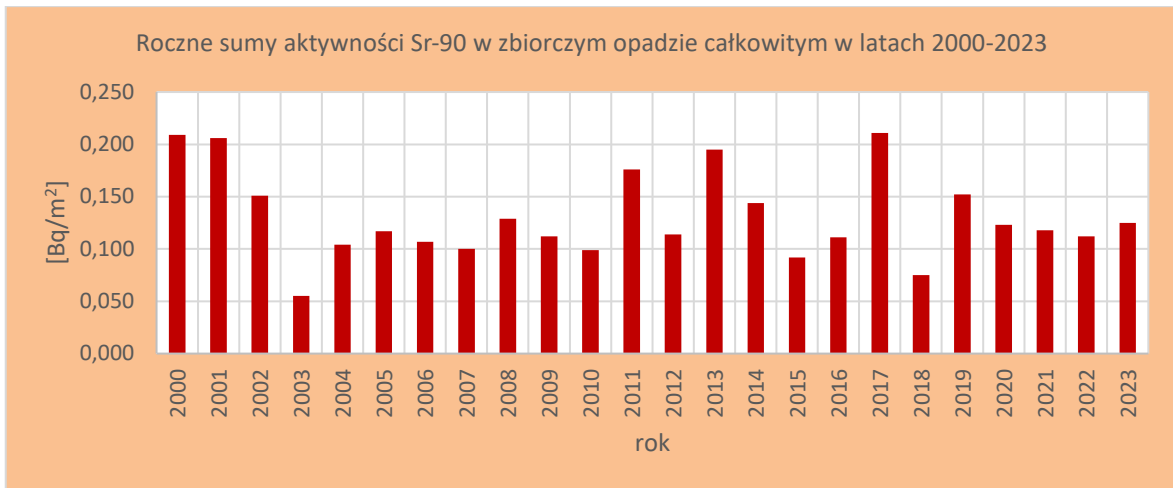
Najwyższe roczne sumy aktywności ^{90}Sr w opadzie całkowitym zmierzono w latach 2000, 2001 oraz 2017 i wynosiły one odpowiednio: 0,209 Bq/m^2 , 0,206 Bq/m^2 i 0,211 Bq/m^2 (Tabela 18). Najniższą wartość odnotowano w roku 2003 (0,055 Bq/m^2), natomiast w pozostałych latach stężenia mieściły się w przedziale od 0,075 Bq/m^2 do 0,195 Bq/m^2 . Roczny dopływ ^{90}Sr wraz z opadem całkowitym w 2023 roku wyniósł 0,125 Bq/m^2 i był o 0,013 Bq/m^2 wyższy niż w roku ubiegłym. Średnia roczna suma tego izotopu w latach 2000-2023 jest na poziomie 0,131 Bq/m^2 .

Tabela 18. Roczna suma aktywności ^{90}Sr w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2023 [Bq/m²]

Rok	^{90}Sr	Rok	^{90}Sr
2000	0,209	2013	0,195
2001	0,206	2014	0,144
2002	0,151	2015	0,092
2003	0,055	2016	0,111
2004	0,104	2017	0,211
2005	0,117	2018	0,075
2006	0,107	2019	0,152
2007	0,100	2020	0,123
2008	0,129	2021	0,118
2009	0,112	2022	0,112
2010	0,099	2023	0,125
2011	0,176	Średnia	0,131
2012	0,114	Minimalna	0,055
		Maksymalna	0,211



Rys.65. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2023



Rys.66. Roczne sumy dopływu ⁹⁰Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2023

3.6 Stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych: ²²⁶Ra, ⁷Be, ²²⁸Ac, ⁴⁰K w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego

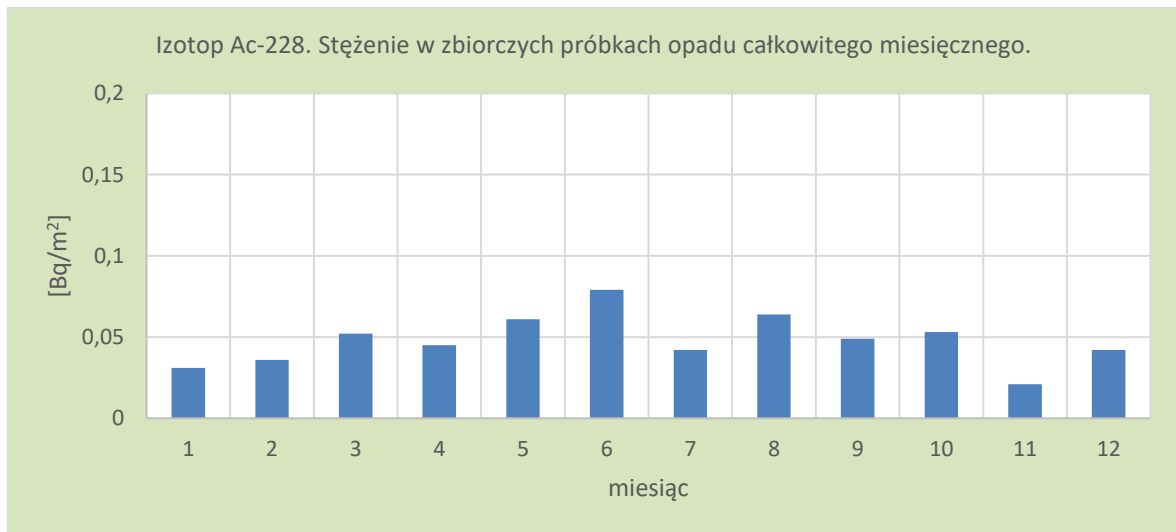
W 2023 roku, w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego oznaczano również stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego: ²²⁶Ra, ⁷Be, ²²⁸Ac i ⁴⁰K. Izotop ⁴⁰K jest najbardziej rozpowszechnionym izotopem z bardzo długim okresem połowicznego rozpadu wynoszącym $1,251 \cdot 10^9$ lat. ²²⁶Ra jest produktem rozpadu w szeregu uranowo – radowym (²³⁸U), jego okres połowicznego rozpadu wynosi 1599 lat. ²²⁸Ac jest produktem rozpadu w szeregu torowym (²³²Th) z połowicznym czasem 6,13 godziny. Źródłem ⁷Be, którego okres połowicznego rozpadu jest stosunkowo krótki – 53,3 dni, jest natomiast promieniowanie kosmiczne.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2023

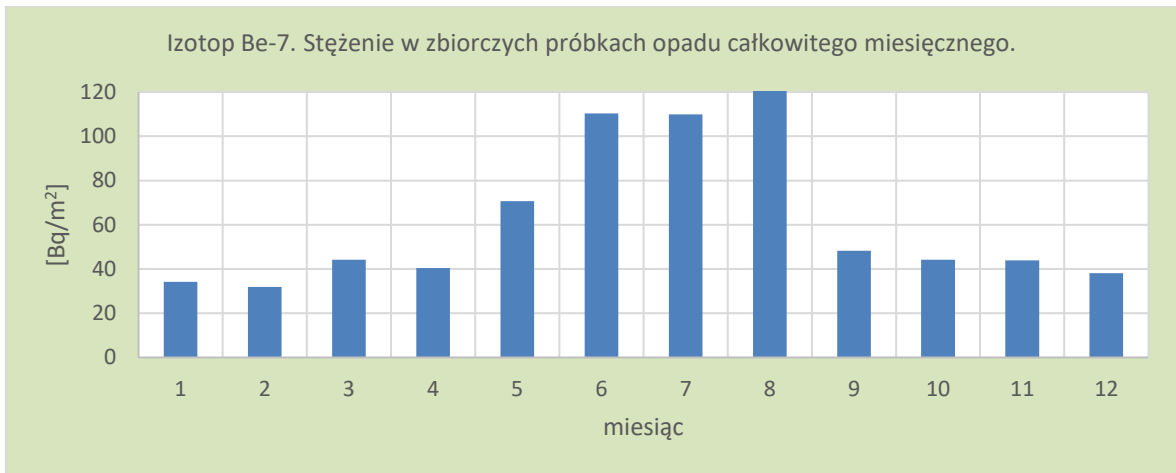
Podobnie jak w latach ubiegłych najwyższą aktywnością charakteryzował się ⁷Be. Średnia roczna aktywność tego izotopu wynosiła 63,303 Bq/m² i wahała się w zakresie od 31,869 Bq/m² (luty) do 143,461 Bq/m² (sierpień) (Tabela 19, Rys. 68). Roczny dopływ tego izotopu był o 122,281 Bq/m² wyższy niż w zeszłym roku i wynosił 759,630 Bq/m² (Tabela 19). W 2023 roku aktywność ⁴⁰K zmieniała się w zakresie od 1,317 Bq/m² (luty) do 2,958 Bq/m² (czerwiec), natomiast roczny dopływ był na poziomie 22,636 Bq/m² (Tabela 19, Rys. 69). W przypadku ²²⁶Ra roczny dopływ tego izotopu był ponad półtora razy niższy niż w ubiegłym roku i wynosił 1,168 Bq/m²/rok, a miesięczne ładunki oscylowały w zakresie od 0,038 Bq/m² (styczeń) do 0,148 Bq/m² (październik) (Tabela 19, Rys. 70). Roczny dopływ ²²⁸Ac wynosił 0,575 Bq/m², a jego miesięczne ładunki mieściły się w przedziale od 0,021 Bq/m² w listopadzie do 0,079 Bq/m² w czerwcu (Tabela 19, Rys. 67).

Tabela 19. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac , ^7Be , ^{40}K oraz ^{226}Ra w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2023 r. [Bq/m^2]

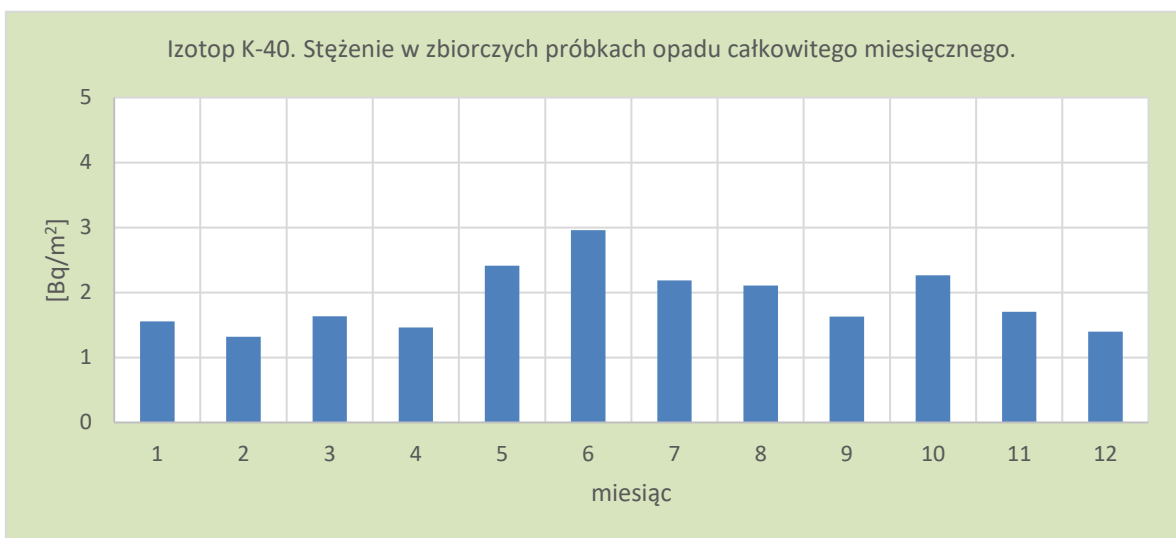
Miesiąc	Ac-228	Be-7	K-40	Ra-226
Styczeń	0,031	34,233	1,556	0,038
Luty	0,036	31,869	1,317	0,091
Marzec	0,052	44,259	1,634	0,144
Kwiecień	0,045	40,367	1,464	0,06
Maj	0,061	70,719	2,414	0,133
Czerwiec	0,079	110,328	2,958	0,133
Lipiec	0,042	109,958	2,186	0,116
Sierpień	0,064	143,461	2,109	0,111
Wrzesień	0,049	48,302	1,63	0,085
Październik	0,053	44,14	2,267	0,148
Listopad	0,021	43,883	1,704	0,065
Grudzień	0,042	38,111	1,397	0,044
Suma roczna	0,575	759,63	22,636	1,168
Średnia	0,048	63,303	1,886	0,097
Minimalna	0,021	31,869	1,317	0,038
Maksymalna	0,079	143,461	2,958	0,148



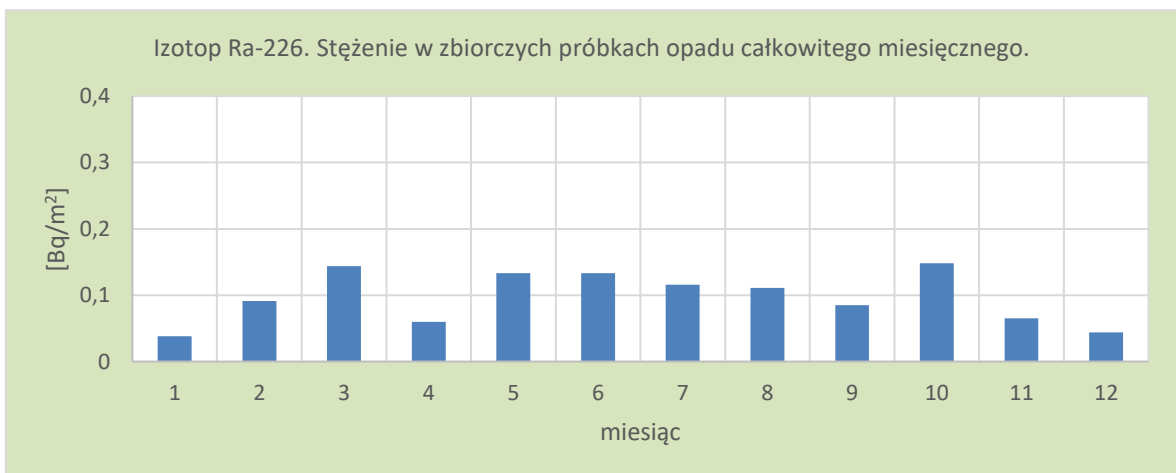
Rys. 67. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2023 roku



Rys.68. Stężenie promieniotwórcze ⁷Be w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2023 roku



Rys.69. Stężenie promieniotwórcze ⁴⁰K w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2023 roku



Rys.70. Stężenie promieniotwórcze ²²⁶Ra w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2023 roku

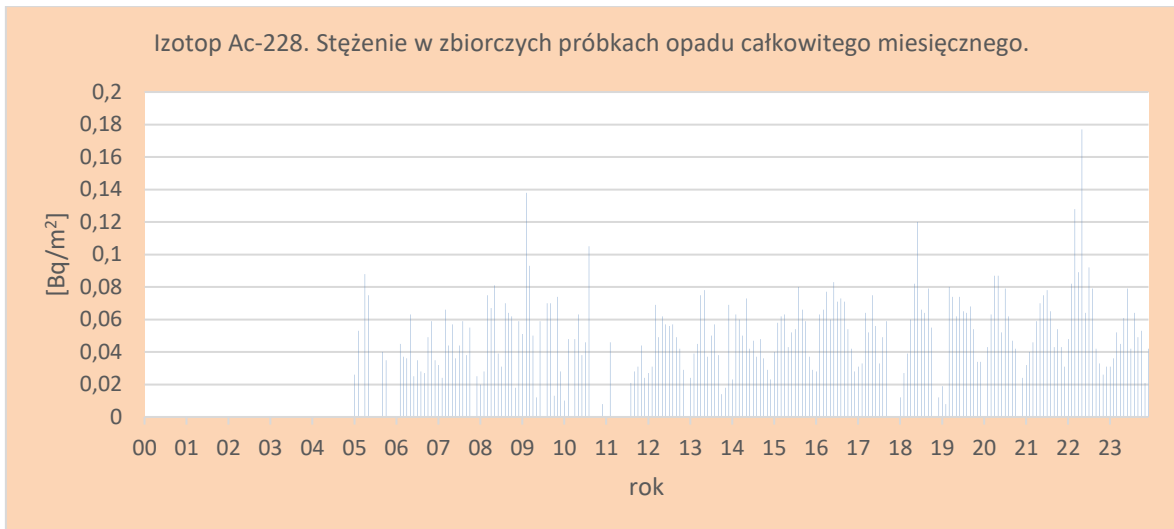
Porównanie wyników uzyskanych w roku 2023 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W okresie od 2000 do 2023 roku (Tabela 20) spośród czterech naturalnych promieniotwórczych izotopów największą zmiennością sezonową charakteryzowały się izotopy ^7Be i ^{40}K (Rys. 67-70). Najwyższe ładunki mierzone były w miesiącach letnich i było to spowodowane, podobnie jak w przypadku ^{137}Cs wypłukiwaniem tych izotopów z atmosfery.

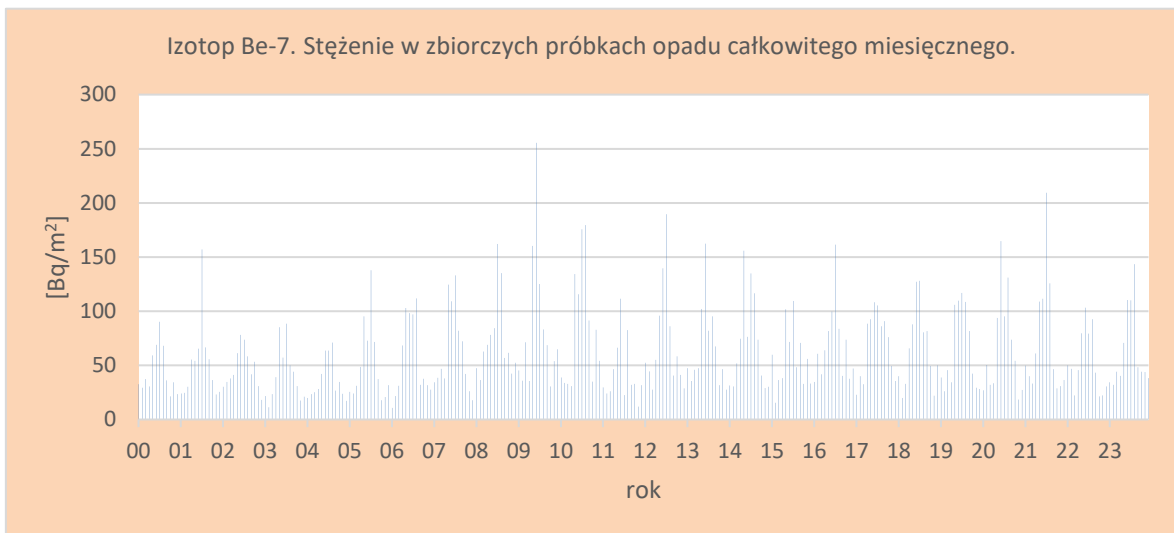
W roku 2023 średnie roczne ładunki pierwiastków: ^{228}Ac , ^7Be ^{40}K były wyższe od średniej uzyskanej z lat 2000-2023, a w przypadku ^{226}Ra ładunek w roku 2023 był niższy od średniej z badanego okresu (Tabela 20).

Tabela 20. Roczna suma aktywności ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac , ^{40}K w zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2023, [Bq/m^2]

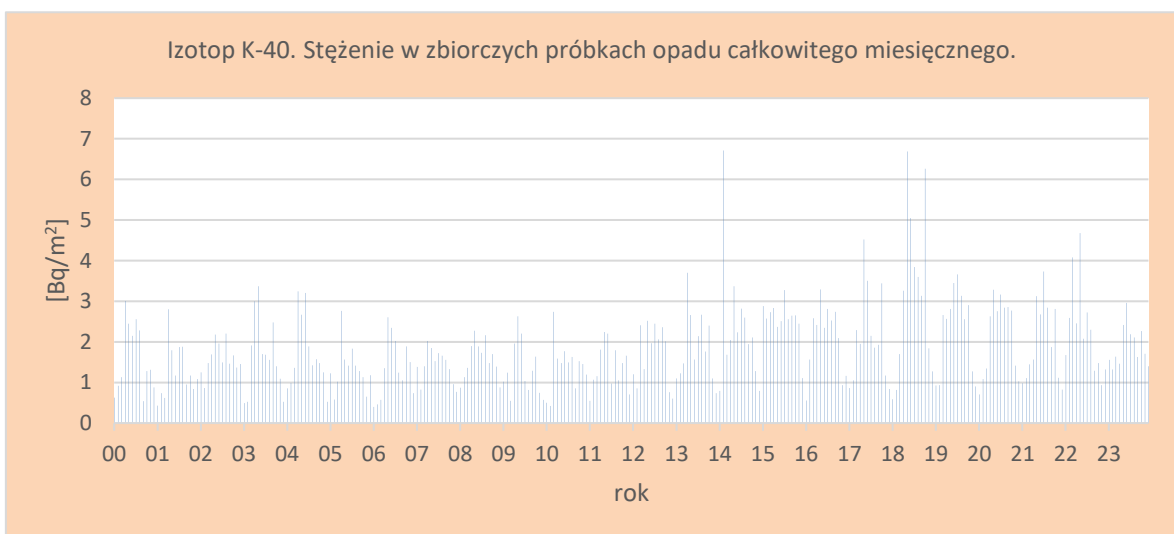
Rok	Ac-228	Be-7	K-40	Ra-226
2000	-	531,96	19,14	2,53
2001	-	618,03	15,34	2,49
2002	-	559,7	19,06	2,49
2003	-	489,52	19,72	2,33
2004	-	439,582	20,447	2,974
2005	0,402	614,147	16,064	2,584
2006	0,45	670,895	16,184	1,068
2007	0,493	764,63	16,991	1,299
2008	0,614	888,322	18,764	1,817
2009	0,676	1029,896	15,692	1,414
2010	0,366	1005,669	16,629	0,814
2011	0,194	517,8	16,686	0,659
2012	0,528	859,883	20,504	1,393
2013	0,069	790,772	22,519	0,848
2014	0,531	845,448	28,378	0,801
2015	0,643	673,615	30,566	0,804
2016	0,716	826,462	25,006	1,45
2017	0,452	827,514	25,547	1,071
2018	0,616	785,165	38,046	1,548
2019	0,636	767,437	27,769	1,192
2020	0,586	801,079	25,871	0,884
2021	0,636	881,847	24,079	1,397
2022	0,891	637,349	27,585	2,091
2023	0,575	759,63	22,636	1,168
Średnia	0,530	732,765	22,051	1,547
Minimalna	0,069	439,582	15,34	0,659
Maksymalna	0,891	1029,896	38,046	2,974



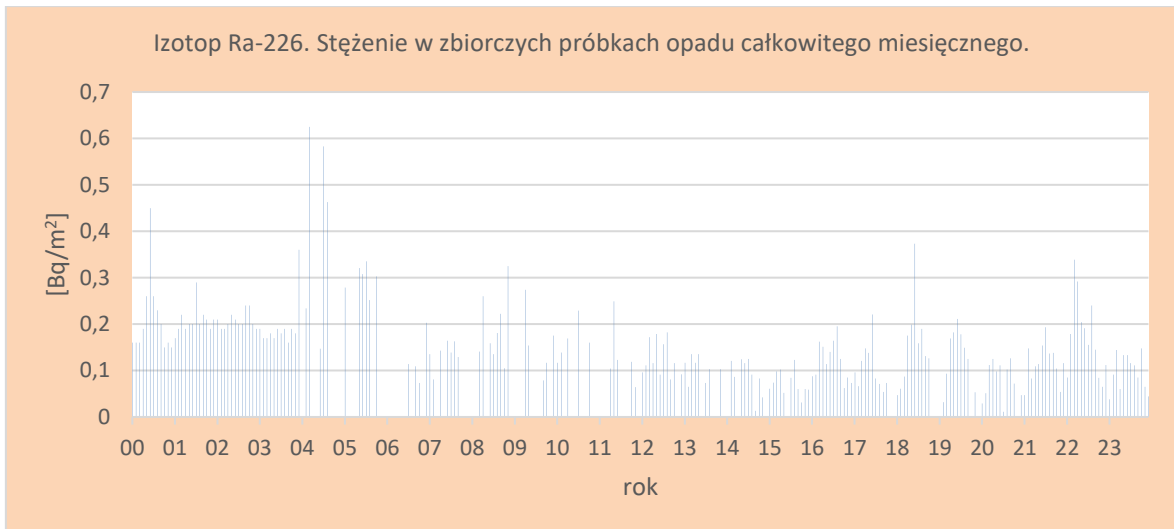
Rys.71. Stężenie promieniotwórcze ²²⁸Ac w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2023



Rys.72. Stężenie promieniotwórcze ⁷Be w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2023



Rys. 73. Stężenie promieniotwórcze ⁴⁰K w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2023



Rys. 74. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2023

4. Podsumowanie

W 2023 roku monitoring radioaktywności przyziemnej warstwy atmosfery prowadzono w ramach umowy GIOŚ/234/2022/DMS/NFOŚ zawartej pomiędzy Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska a Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytutem Badawczym.

Pomiary prowadzono na stacjach sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych działających w ramach infrastruktury IMGW-PIB, zlokalizowanych w Warszawie, Gdyni, Włodawie, Świnoujściu, Gorzowie Wlkp., Poznaniu³, Lesku, Zakopanem, Legnicy i Mikołajkach.

W 2023 roku prowadzono pomiary następujących parametrów:

1. Moc dawki promieniowania gamma,
2. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach w powietrzu,
3. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach w powietrzu,
4. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach w powietrzu,
5. Globalna aktywność beta całkowitego opadu dobowego oraz wody opadowej,
6. Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego,
7. Pomiar spektrometryczny stężenia promieniotwórczego izotopów sztucznych: ^{137}Cs i ^{134}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego,
8. Pomiar spektrometryczny izotopów naturalnych w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego,
9. Pomiar radiochemiczny aktywności izotopu ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego.

Wyniki uzyskane w roku 2023 zestawiono w Tabeli 21.

³ Z racji uzupełniającego się programu pomiarowego stacja Gorzów Wlkp. oraz Poznań są traktowane jako jedna stacja.

Tabela 21. Zestawienie wyników uzyskanych w roku 2023

Lp.	Rodzaj pomiaru	Wartość średnia/Suma roczna ⁴			
1.	Moc dawki promieniowania gamma. <i>Wartości na poziomie tła</i>	Wartość średnia 80,9 nSv/h Str. 18			
2.	Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach powietrza <i>Wartości na poziomie tła</i>	Wartość średnia 5,327 Bq/m³ Str. 24			
3.	Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach <i>Wartości na poziomie tła</i>	Wartość średnia 0,051 Bq/m³ Str. 28			
4.	Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach powietrza <i>Wartości na poziomie tła</i>	Wartość średnia 0,243 Bq/m³ Str. 32			
5.	Globalna aktywność beta całkowitego opadu dobowego oraz roczna suma aktywności beta całkowitego opadu dobowego. <i>Wartości na poziomie tła</i>	Wartość średnia 0,9 Bq/m² Str. 36	Średnia suma roczna 0,326 kBq/m² Str. 36		
6.	Globalna aktywność beta wody opadowej <i>Wartości na poziomie tła</i>	Wartość średnia 319 mBq/l Str. 41			
7.	Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego <i>Wartości na poziomie tła</i>	Wartość średnia 7,9 Bq/m² Str.46			
8.	Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego <i>Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą</i>	Wartość średnia 0,021 Bq/m² Str. 51	Suma roczna 0,249 Bq/m² Str.51		
9.	Stężenie promieniotwórcze ¹³⁴ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego <i>Bardzo niskie wartości na poziomie zdolności detekcyjnych aparatury</i>	<i>Poniżej zdolności detekcji</i>		<i>Poniżej zdolności detekcji</i>	
10.	Stężenie promieniotwórcze ⁹⁰ Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. <i>Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą</i>	Wartość średnia 0,010 Bq/m² Str. 54	Suma roczna 0,125 Bq/m² Str. 55		
12.	Sumy roczne aktywności ²²⁸ Ac, ⁷ Be, ⁴⁰ K, ²²⁶ Ra, w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. [Bq/m ²] <i>Wartości na poziomie tła Str. 57</i>	Ac-228	Be-7	K-40	Ra-226
0,575		759,63	22,636	1,168	

⁴ Suma roczna dotyczy tylko wyników spektrometrycznych oraz opadu całkowitego dobowego.

5. Wnioski

Poziom promieniotwórczości w przyziemnej warstwie atmosfery związany z obecnością izotopów promieniotwórczych sztucznych i naturalnych w 2023 roku nie odbiegał w sposób znaczący od poziomu, który obserwowano w poprzednich latach.

Średnia roczna wartość mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu wyznaczona na podstawie danych dobowych zmierzonych na 9 stacjach w 2023 roku wyniosła 80,9 nSv/h i jest niższa od obserwowanej w roku poprzednim o 2,2 nSv/h. Zaobserwowane niższe wartości w roku 2023, podobnie jak w roku poprzednim, są spowodowane głównie wprowadzeniem w 2022 roku nowych współczynników kalibracyjnych przez producenta w związku z wdrożeniem przez PAA Komputerowego Centrum Analizy Danych i zintegrowaniem danych pomiarowych ze stacji IMGW-PIB z systemem PAA. W latach 2000-2023 nie obserwowano wyraźnych trendów ani istotnych zmian średniej mocy dawki promieniowania gamma charakterystycznej dla obszaru Polski. W omawianym okresie wartości te zmieniały się w przedziale od 80,9 nSv/h w 2023 roku do 99,1 nSv/h w 2000. Średnia wartość mocy dawki promieniowania gamma uzyskana ze średnich rocznych w badanych latach wyniosła 92,8 nSv/h.

W roku 2023 średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolach zawieszonych w powietrzu było o 1,755 Bq/m³ wyższe niż w roku ubiegłym i wynosiło 5,3 Bq/m³. Średnia obliczona na podstawie danych z okresu 2000 – 2023 wynosi 7,1 Bq/m³.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w 2023 roku wyniosło 0,051 Bq/m³ i było około 3 razy niższe niż w roku poprzednim, w którym średnie roczne stężenie (0,164 Bq/m³) było najwyższe dla okresu 2000-2023. W badanym okresie najniższe średnie roczne stężenie 0,004 Bq/m³ przypada na rok 2001. Średnie stężenie wyznaczone dla okresu 2000-2023 wynosi 0,044 Bq/m³.

Średnie roczne stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta w 2023 roku wyniosło 0,243 Bq/m³ i było niższe niż w roku ubiegłym o 0,207 Bq/m³. Średnie roczne stężenia uzyskane w latach 2015-2023 były jednymi z najwyższych spośród wszystkich średnich odnotowanych od 2000 roku. Wartości te są kilkunastokrotnie wyższe niż najmniejsze średnie stężenie przypadające na rok 2001. Aktywności te uznawane są za niskie, pozostające na poziomie tła i niestanowiące zagrożenia. Średnia aktywność badanego promieniowania w aerozolach w badanym okresie wyniosła 0,149 Bq/m³.

Zarówno stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie alfa pochodzenia naturalnego, jak i stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie alfa i beta pochodzenia sztucznego w aerozolach zawieszonych w powietrzu pozostały na poziomie zbliżonym do lat poprzednich. Są to niskie wartości, niestanowiące zagrożenia.

Globalna aktywność beta dla całego obszaru Polski, opisująca dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta do powierzchni Ziemi, obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wyznaczonych stacjach w 2023 roku wyniosła 0,33 kBq/m²/rok. Wartość średnia obliczona dla okresu 2000-2023 utrzymuje się na poziomie 0,32 kBq/m²/rok.

W 2023 roku średnia aktywność beta wody opadowej wyniosła 319 mBq/l. Średnia aktywność beta wody opadowej w okresie 2000-2023 utrzymuje się na poziomie 337 mBq/l.

Średnia aktywność promieniowania beta w całkowitym miesięcznym opadzie w roku 2023 wyniosła 8,0 Bq/m² i była o 0,9 Bq/m² wyższa od średniorocznej aktywności z zeszłego roku. W latach 2000-2023 najniższą wartość uzyskano w roku 2005 (6,0 Bq/m²), najwyższa zaś przypada na rok 2017 (8,7 Bq/m²). Średnia aktywność tego promieniowania w całkowitym opadzie miesięcznym w omawianym okresie wyniosła 7,3 Bq/m².

W 2023 roku średni ładunek ^{137}Cs wraz z opadem atmosferycznym wynosił $0,021 \text{ Bq/m}^2$, w przypadku ^{134}Cs stężenia tego izotopu były poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej. Najniższe ładunki ^{137}Cs odnotowane zostały w styczniu i marcu ($0,007 \text{ Bq/m}^2$) oraz lutym ($0,008 \text{ Bq/m}^2$), natomiast najwyższe w maju ($0,089 \text{ Bq/m}^2$).

Roczna suma dopływu ^{137}Cs w 2023 roku wynosiła $0,249 \text{ Bq/m}^2$ i była o $0,107 \text{ Bq/m}^2$ niższa od wartości w 2022 ($0,356 \text{ Bq/m}^2$), a jednocześnie 4 razy mniejsza od wartości uzyskanej w 2011 roku ($1,067 \text{ Bq/m}^2$), kiedy odnotowano podwyższoną depozycję na skutek awarii elektrowni atomowej w Fukushima. Średnia suma rocznych dopływów ^{137}Cs dla okresu 2000-2023 wynosiła $0,503 \text{ Bq/m}^2$.

W przypadku izotopu ^{134}Cs , tylko w latach 2011 i 2012 określono jego dopływ, w pozostałych latach jego stężenia nie przekraczały limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej. Od 2000 roku oprócz incydentu w Fukushima nie zanotowano obecności ^{134}Cs w powietrzu.

Najwyższe stężenie ^{90}Sr zarejestrowano w maju ($0,030 \text{ Bq/m}^2$) i czerwcu ($0,021 \text{ Bq/m}^2$). Najniższą aktywność stwierdzono w styczniu ($0,003 \text{ Bq/m}^2$). Pozostałe stężenia promieniotwórcze w kolejnych miesiącach mieściły się w przedziale od $0,004 \text{ Bq/m}^2$ do $0,013 \text{ Bq/m}^2$. Roczny dopływ ^{90}Sr wraz z opadem całkowitym w 2023 roku wyniósł $0,125 \text{ Bq/m}^2$ i był o $0,013 \text{ Bq/m}^2$ wyższy niż w roku ubiegłym. Średnia roczna suma tego izotopu w latach 2000-2023 jest na poziomie $0,131 \text{ Bq/m}^2$.

W okresie od 2000 do 2023 roku, spośród czterech naturalnych promieniotwórczych izotopów największą zmiennością sezonową charakteryzowały się izotopy ^7Be i ^{40}K . Najwyższe ładunki mierzone były w miesiącach letnich i było to spowodowane, podobnie jak w przypadku ^{137}Cs wypłukiwaniem tych izotopów z atmosfery. W roku 2023 roczne dopływy pierwiastków wynosiły: $0,575 \text{ Bq/m}^2$ - ^{228}Ac , $759,63 \text{ Bq/m}^2$ - ^7Be , $22,636 \text{ Bq/m}^2$ - ^{40}K oraz $1,168 \text{ Bq/m}^2$ - ^{226}Ra .