

**INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
Oddział Morski w Gdyni**



**„Monitoring promieniowania jonizującego realizowany
w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska.
*Zadanie 1: Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego
wykrywania skażeń promieniotwórczych*”.**

**ETAP III
RAPORT PRZEDSTAWIAJĄCY WYNIKI I ANALIZY
ZA ROK 2016**



Praca wykonana na podstawie Umowy IMGW-PIB z GIOŚ nr 36/2015/F finansowanej ze środków Umowy NFOŚiGW-GIOŚ nr 313/2015/Wn-50/MN-PO/D z 29.07.2015 r. o realizację zadania państwowej jednostki budżetowej zakwalifikowanego do dofinansowania.

Autorzy:

Mgr Andrzej Czuryłowski

Mgr Paweł Miszczuk

Mgr Michał Saniewski

Dr hab. inż. Tamara Zalewska

Mgr Karolina Gębka

Sprawdził

Zatwierdził

Spis treści

1. Cel i zakres pracy
2. Metodyka badań prowadzonych na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych
 - 2.1. Pobieranie i przygotowanie próbek
 - 2.2. Metody pomiarowe wraz z opisem systemu zapewnienia jakości pomiarów
3. Wyniki i omówienie wyników z 2016 roku oraz w odniesieniu do okresu 2000-2015
 - 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 stanowią realizację programu Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2016-2020¹.

Państwowy Monitoring Środowiska, według art. 25 ust. 2 ustawy - Prawo Ochrony Środowiska, jest systemem: pomiarów, ocen i prognoz stanu środowiska oraz gromadzenia, przetwarzania i rozpowszechniania informacji. Program został opracowany w Departamencie Monitoringu i Informacji o Środowisku Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Raporty roczne z analizą wyników publikowane są na stronie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska².

Dnia 30 września 2015 roku podpisana została umowa między IMGW - PIB a Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska pt.: „Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska. 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 2015 roku do 30 września 2018 roku, jak również do przedstawiania uzyskanych wyników w postaci zestawień oraz raportów rocznych.

Niniejszy raport obejmuje pomiary od 1 stycznia 2016 do 31 grudnia 2016 r., **które zostały wykonane w ramach umowy „Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska. 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.

Zakres zadań obejmuje:

- a) 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).
- b) 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 wyznaczonej aktywności sztucznych emiterów beta promieniotwórczych.
- c) 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).
- d) Spektrometryczne pomiary aktywności ¹³⁷Cs i wybranych naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego.
- e) Radiochemiczne oznaczanie ⁹⁰Sr w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono wyniki uzyskane w roku 2016 wraz z komentarzem uwzględniającym dane z lat poprzednich. Wyniki przedstawiono w postaci tabelarycznej i graficznej.

¹ <http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/pms>

² <http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-promieniowania-jonizujacego>



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

2. Metodyka badań prowadzonych na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych

2.1. Pobieranie 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 opad 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 są następujące: średnica wewnętrzna – 25 mm, głębokość – 4 mm. Gęstość powierzchniowa warstwy popiołu w miseczce pomiarowej nie powinna przekraczać 50 mg cm⁻³, co pozwala na zaniechanie 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 są następujące: średnica wewnętrzna – 25 mm, głębokość – 4 mm. Gęstość powierzchniowa warstwy popiołu w miseczce pomiarowej nie powinna przekraczać 50 mg cm⁻³, co pozwala na zaniechanie samoabsorpcji.
- c) Pobór próbek aerozoli powietrza odbywa się poprzez wymuszony przepływ powietrza przez odpowiednie filtry w cyklach półgodzinnych i w takiej postaci poddane 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 ok. 1 metr nad powierzchnią ziemi, dokonująca 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 scyntylacyjny 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 specjalizowane 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 bateryjnym,
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.

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 (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 ołowiovą 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 dużą 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_α 8,78 MeV), względnie do poprawiania metody ABPD z dyskryminacją energii Alfa, poprzez wybór progu dyskryminacji Alfa powyżej 6 MeV.
- Kasetę 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 filtra przy małym naprężeniu i czyni go mniej wrażliwym na zerwanie, nawet w przypadku wilgotnej taśmy filtracyjnej. Kasetę wykonaną 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 filtra 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. Możliwość 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.

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 specjalizowane oprogramowanie TDR.

We wspólnej obudowie TDSPI zainstalowane są:

1. Dwutorowy spektrometr TDSPI zawierający dwa niezależne torry 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 (500-1500V; 0,3mA),
 - b. przedwzmacniacz,
 - c. wzmacniacz spektrometryczny o parametrycznie ustawianym wzmocnieniu zgrubnym (x1, x2, x4, x8) i precyzyjnym (1...4095)
 - d. analizator 512-kanalowy,
 - e. przelicznik do zliczania impulsów z zadanego 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 10V).
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 (+5V / 300mA),
 - b. spektrometru TDSPI,
 - c. przedwzmacniacza sond SSU (+24 V / 15 mA) oraz gamma (+/-12V),
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.

Specjalizowane 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, uzgodnionej z Zamawiającym, 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

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

2. Aktywność próbki

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

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.

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 40% 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 zastosowano wzorce w geometrii naczynia cylindrycznego o średnicy 40 mm stosowanego w pomiarach zawierające mieszaninę izotopów emitujących promieniowanie gamma – „mix gamma” wyprodukowane przez Ośrodek Produkcji i Dystrybucji Izotopów w Świerku. Kalibrację przeprowadzono, wykorzystując wzorce o różnych wysokościach: 3, 6, 9, 15 mm, co umożliwia wybór odpowiedniej kalibracji dla próbek o różnej grubości warstwy popiołu. Dla uzyskania gęstości próbek opadu całkowitego w granicach $0,9 - 1,2 \text{ g cm}^{-3}$, 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-62/52/12	BW/ Z-62/53112	BW/ Z-62/54112	BW/ Z-62/55/12	
Grubość warstwy		3 mm	6 mm	9 mm	15mm	
Data referencyjna	1 lipca 2012					
Gęstość	1,15g cm ⁻³					
	Okres półrozpadu	Energia (MeV)	Aktywność (kBq)			
²⁴¹ Am	432,6 ± 0,6 lat	0,026 0,060	4,94 ± 0,08	4,98 ± 0,09	4,96 ± 0,09	5,09 ± 0,09
¹⁰⁹ Cd	461,4 ± 1,2 dni	0,088	18,96 ± 0,42	19,13 ± 0,43	19,06 ± 0,43	19,57 ± 0,44
⁵⁷ Co	271,80 ± 0,05 dni	0,014 0,122 0,136	0,85 ± 0,01	0,85 ± 0,01	0,85 ± 0,01	0,87 ± 0,01
⁵¹ Cr	27,703 ± 0,003 dni	0,320	19,32 ± 0,35	19,49 ± 0,35	19,42 ± 0,35	19,94 ± 0,36
¹¹³ Sn	115,09 ± 0,03 dni	0,255 0,392	3,41 ± 0,08	3,44 ± 0,08	3,43 ± 0,08	3,52 ± 0,08
⁸⁵ Sr	64,850 ± 0,007 dni	0,514	2,90 ± 0,05	2,93 ± 0,05	2,92 ± 0,05	3,00 ± 0,05
¹³⁷ Cs	30,05 ± 0,08 lat	0,662	3,82 ± 0,08	3,85 ± 0,08	3,84 ± 0,08	3,94 ± 0,08
⁵⁴ Mn	312,13 ± 0,03 dni	0,835	4,79 ± 0,09	4,83 ± 0,09	4,81 ± 0,09	4,94 ± 0,09
⁶⁵ Zn	244,01 ± 0,09 dni	1,116	9,51 ± 0,15	9,60 ± 0,15	9,56 ± 0,15	9,82 ± 0,15
⁶⁰ Co	5,2710 ± 0,0008 lat	1,173 1,332	5,26 ± 0,07	5,31 ± 0,07	5,29 ± 0,07	5,43 ± 0,07

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, przeprowadzanego 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 nieniszczącą 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 szczawowego, 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 dodajemy kilka mililitrów kwasu, następnie dozujemy kwas kroplami aż do całkowitego rozpuszczenia osadu).

- Powtórne wytrącanie szczawianów przebiega w sposób analogiczny do pierwotnego (do roztworu dodajemy kroplami stężony amoniak do uzyskania pH 4-4,5 i wytrącenia osadu, następnie całość podgrzewamy 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 tygła i spala w piecu mufowym w temperaturze $650 - 700^\circ\text{C}$. Następnie tygiel wyjmuje się z pieca i studzi.

4. Rozpuszczanie popiołu.

Osad w tygłu zwilża się wodą destylowaną, dodaje kilka mililitrów HNO_3 (1:1) aż do całkowitego rozpuszczenia osadu. Roztwór z tygła 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 odrzucamy.

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 dodajemy 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 próbę pozostawia się przez 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 HNO₃, 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 HNO₃ (1:1). Następnie dodajemy 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 ⁹⁰Y równoważnej aktywności ⁹⁰Sr powinien być wykonany nie później niż 2 godziny od chwili oddzielenia Y(OH)₃ od reszty roztworu. Jeżeli pomiar zostanie przeprowadzony później, należy uwzględnić rozpad promieniotwórczy ⁹⁰Y.

Pomiary aktywności prowadzone są z zastosowaniem niskotłowego licznika przepływowego FHT 770T, który umożliwia równoległy pomiar 6 próbek. 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 ⁹⁰Y o znanej aktywności i geometrii identycznej z geometrią próbek.

Obliczanie aktywności ⁹⁰Sr w próbach opadu całkowitego:

$$A = \frac{N_0 \times \eta}{S}, \text{ gdzie: } A - \text{aktywność [Bq m}^{-2}\text{]}$$

N₀ – 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 [m²]

W przypadku, gdy czas, który upłynął od chwili oddzielenia Y(OH)₃ od roztworu do rozpoczęcia pomiaru przekracza 2 godziny należy zastosować mnożnik uwzględniający rozpad promieniotwórczy radioizotopu ⁹⁰Y:

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

t₀ – godzina oddzielenia osadu od roztworu

t₁ – godzina odpowiadająca połowie czasu pomiaru próbki

(t₁ – t₀) – 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]

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

3. Wyniki i omówienie wyników z 2016 roku oraz w odniesieniu do okresu 2000-2015

3.1. Moc dawki promieniowania gamma w powietrzu

Moc dawki promieniowania gamma definiujemy jako ilość energii promieniowania jonizującego przekazana jednostce masy w jednostce czasu.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

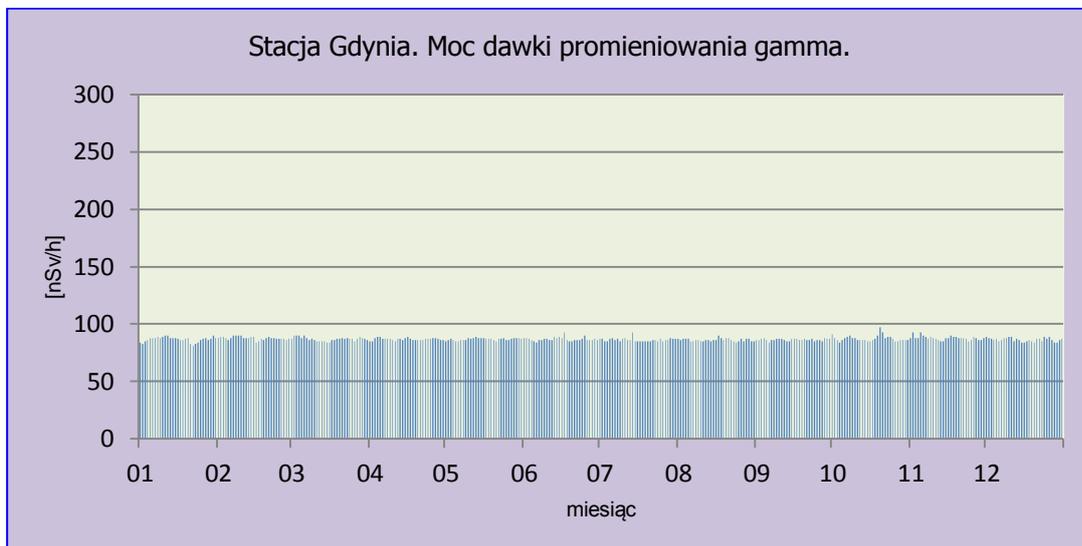
Poziom promieniowania gamma związany z obecnością izotopów emitujących promieniowanie gamma w atmosferze określany jest za pomocą mocy dawki. W 2016 roku wartości mocy dawki promieniowania gamma w atmosferze mierzone były w reżimie dobowym na 9 stacjach IMGW-PIB: Warszawa, Gdynia, Mikołajki, Gorzów Wielkopolski, Świnoujście, Legnica, Włodawa, Zakopane, Lesko. Otrzymane wartości zmieniały się w szerokim zakresie (Rys. 2-10), od najniższej średniej miesięcznej wartości 75,4 nSv h⁻¹ uzyskanej w lipcu na stacji Świnoujście do maksymalnej zarejestrowanej w czerwcu w Zakopanem – 122,1 nSv h⁻¹ (Tabela 1). Zbliżoną średnią roczną moc dawki promieniowania gamma uzyskaną z wartości dobowych odnotowano odpowiednio na stacjach: Warszawa, Świnoujście, Włodawa (< 80 nSv h⁻¹), Gdynia, Gorzów Wielkopolski (ok. 87 nSv h⁻¹), Mikołajki, Legnica, Lesko (ok. 100 nSv h⁻¹) oraz Zakopane (118,1 nSv h⁻¹). Najwyższe wartości mocy dawki odnotowane w Zakopanem mają jednoznacznie związek z faktem, że promieniowanie w rejonach górskich jest największe. Na stacjach zlokalizowanych w miejscowościach położonych znacznie niżej względem poziomu morza: Warszawa, Gdynia, Gorzów Wielkopolski, Świnoujście średnia roczna moc dawki promieniowania gamma była niższa niż uzyskana dla średniej dla całej Polski, co wskazuje na to, że głównym elementem determinującym moc dawki promieniowania gamma jest lokalizacja geograficzna (Tabela 1). W 2016 roku średnia roczna ze wszystkich stacji wynosiła 92,1 nSv h⁻¹ i była bardzo zbliżona do wartości odnotowanej w roku ubiegłym (91,5 nSv h⁻¹). Średnie wartości mocy dawki wyliczone na podstawie danych ze wszystkich stacji dla poszczególnych miesięcy były bardzo zbliżone w zakresie od 90,2 do 93,9 nSv h⁻¹. Jedynie w grudniu odnotowano wartość nieco niższą (87,9 nSv h⁻¹).

Tabela 1. Średnie miesięczne wartości mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu w 2016 roku, nSv h⁻¹.

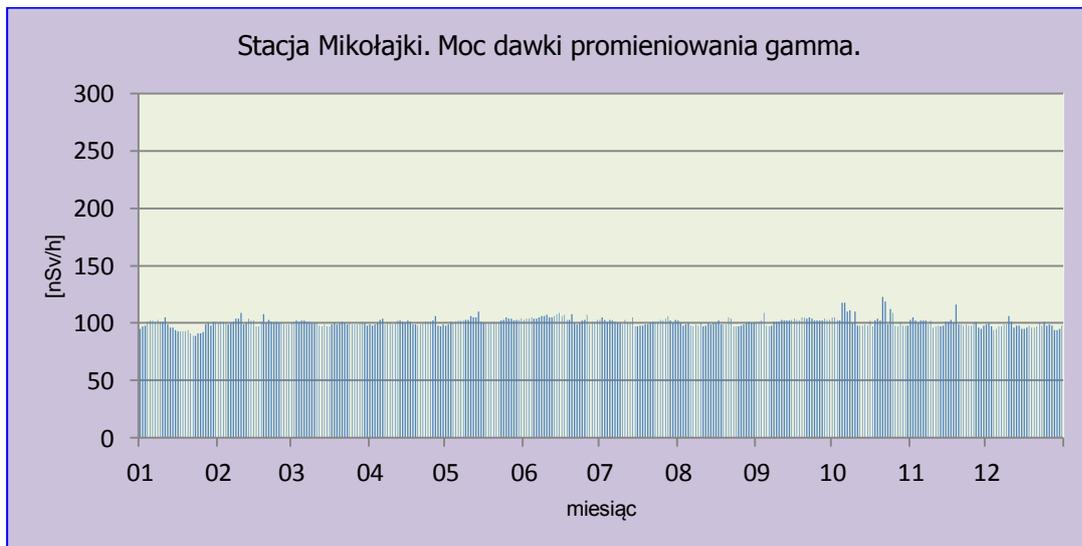
Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	76,2	86,7	96,7	85,2	76,8	95,4	76,6	115,9	101,9	90,2
Luty	79,2	87,8	101,1	86,2	77,5	95,6	80,2	115,4	104,4	91,9
Marzec	77,9	86,9	99,7	85,6	76,3	94,4	79,8	119,7	104,2	91,6
Kwiecień	78,4	86,8	100,3	86,1	76,7	94,7	79,4	121,2	104,1	92,0
Maj	79,4	86,8	102,3	87,3	77,0	98,4	80,0	120,7	104,7	92,9
Czerwiec	79,2	86,8	104,1	86,6	76,3	100,4	81,2	122,1	107,8	93,8
Lipiec	80,7	86,3	101,2	86,3	75,4	99,1	81,2	121,9	106,0	93,1
Sierpień	80,6	86,2	99,4	86,8	75,6	99,8	79,4	119,9	104,9	92,5
Wrzesień	81,5	86,3	102,4	88,4	76,1	101,9	81,1	120,8	106,9	93,9
Październik	83,0	87,5	104,3	87,3	76,4	96,6	82,0	120,5	105,3	93,6
Listopad	80,2	88,0	100,2	86,8	77,4	95,2	80,4	117,4	102,8	92,0
Grudzień	78,4	86,4	97,5	85,4	75,6	93,3	78,0	102,1	94,5	87,9
Minimalna średnia miesięczna	76,2	86,2	96,7	85,2	75,4	93,3	76,6	102,1	94,5	87,4
Maksymalna średnia miesięczna	83,0	88,0	104,3	88,4	77,5	101,9	82,0	122,1	107,8	93,9
Średnia roczna dobowo dla 2016r.	79,5	86,9	100,7	86,5	76,4	97,1	79,9	118,1	103,9	92,1



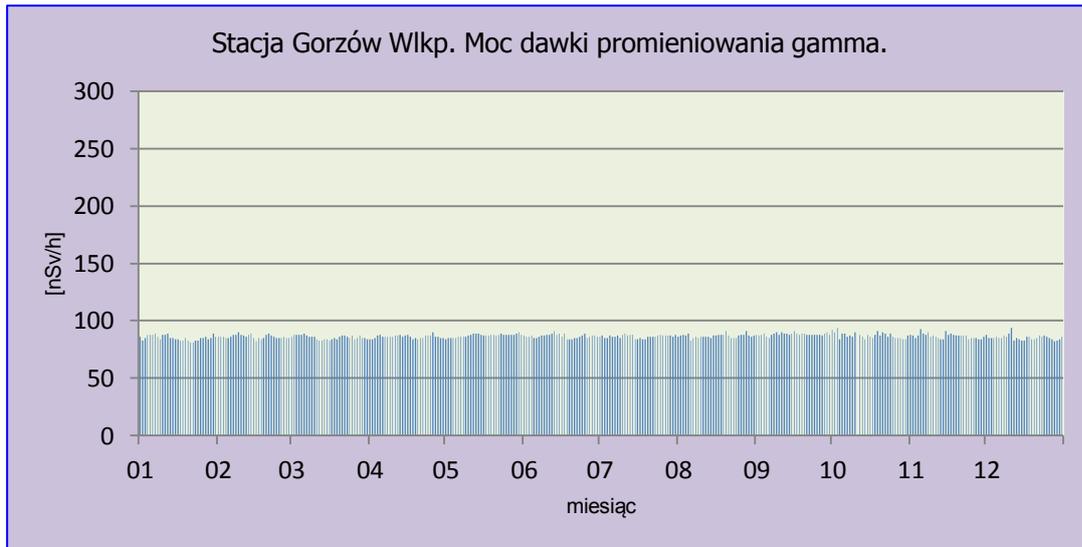
Rys. 2. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Warszawa w 2016 roku.



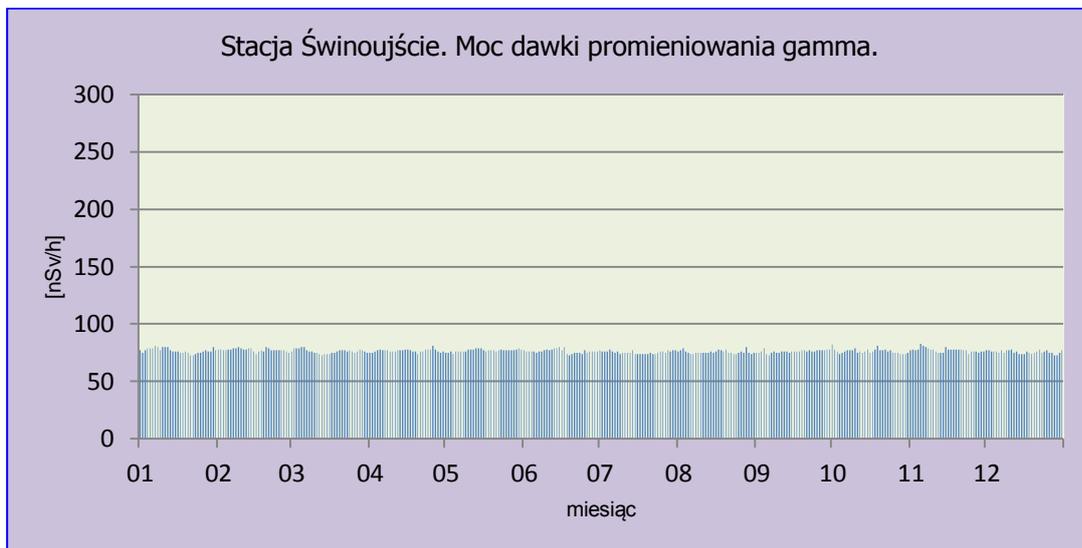
Rys. 3. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gdynia w 2016 roku.



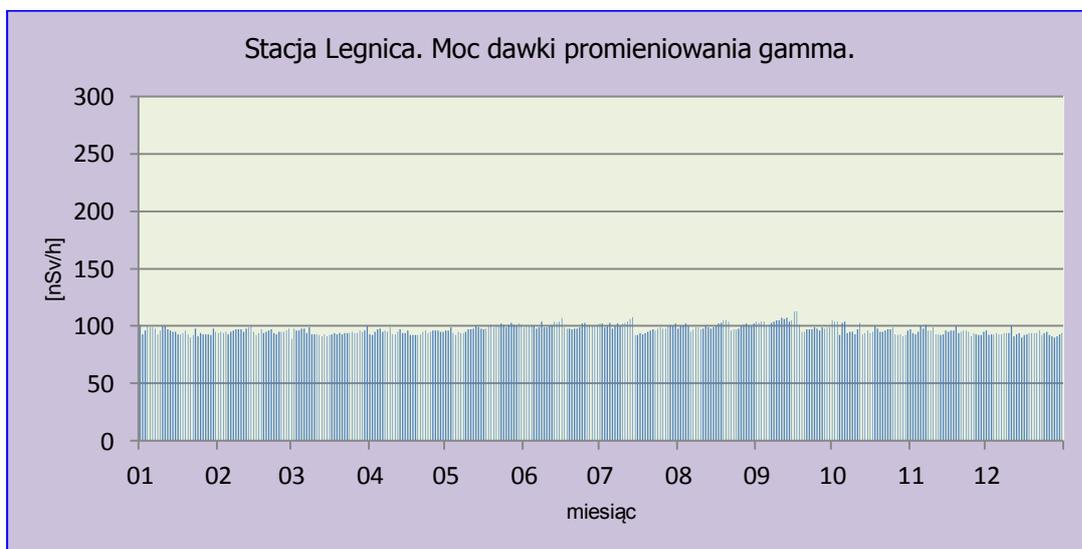
Rys. 4. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Mikołajki w 2016 roku.



Rys. 5. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gorzów Wlkp. w 2016 roku.



Rys. 6. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Świnoujście w 2016 roku.



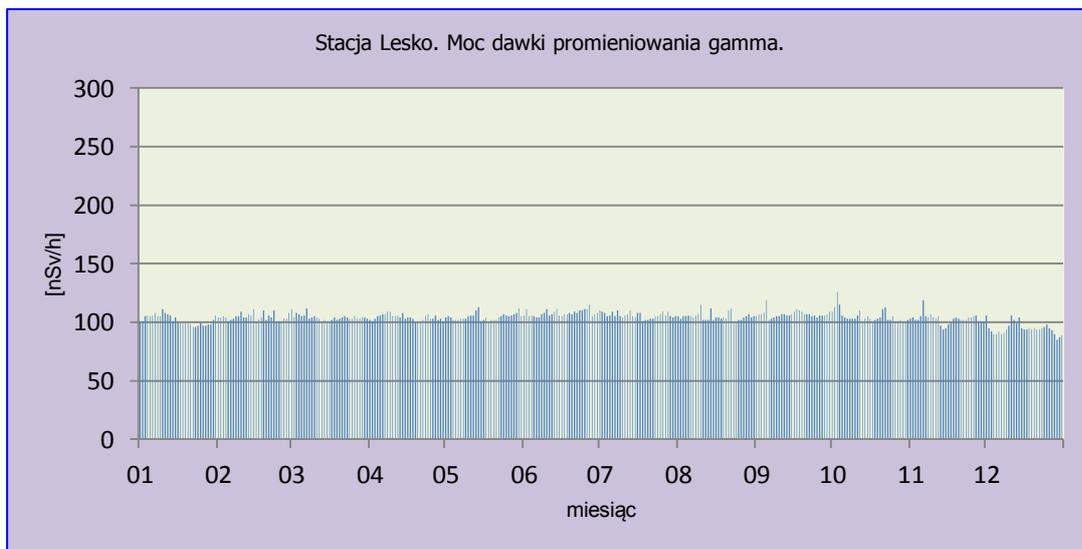
Rys. 7. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Legnica w 2016 roku.



Rys. 8. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Włodawa w 2016 roku.



Rys. 9. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Zakopane w 2016 roku.



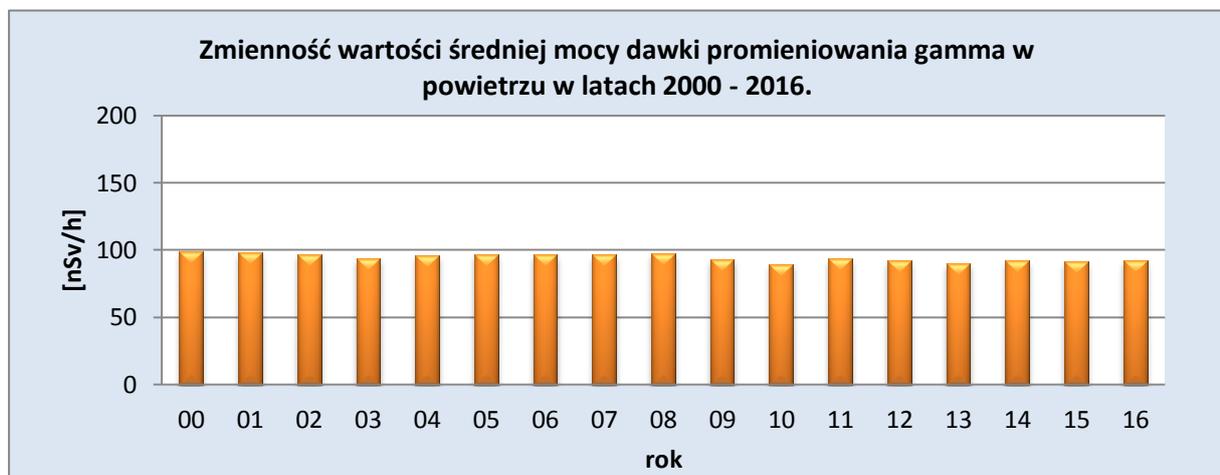
Rys. 10. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Lesko w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 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 2016 roku wynosiła 92,1 nSv h⁻¹ i była wyższa od obserwowanej w roku poprzednim o 0,6 nSv h⁻¹ (Tabela 2, Rys. 11). W latach 2000 - 2016 nie obserwowano wyraźnych trendów ani istotnych zmian średniej mocy dawki promieniowania gamma charakterystycznej dla obszaru Polski. W omawianym okresie wartości te zmieniały się w stosunkowo wąskim przedziale od 89,6 nSv h⁻¹ w 2010 roku do 99,1 nSv h⁻¹ w 2000. Średnia wartość mocy dawki promieniowania gamma uzyskana ze średnich rocznych w badanych latach wynosiła 94,4 nSv h⁻¹.

Tabela 2. Wartość średniej rocznej mocy dawki promieniowania gamma w latach 2000 – 2016, nSv h⁻¹.

Rok	Średnia roczna moc dawki promieniowania gamma
2000	99,1
2001	98,3
2002	96,7
2003	93,8
2004	96,1
2005	96,8
2006	96,7
2007	96,6
2008	97,7
2009	93,1
2010	89,6
2011	93,3
2012	91,8
2013	90,1
2014	92
2015	91,5
2016	92,1
Średnia	94,4
Minimalna	89,6
Maksymalna	99,1



Rys. 11. Średnia roczna moc dawki promieniowania gamma w latach 2000-2016.

3.2. Radioaktywność próbek aerozoli w powietrzu

Pochodzenie promieniotwórczości jest związane z oddziaływaniem promieni kosmicznych na jądra atomów gazów w atmosferze, w wyniku czego powstają izotopy promieniotwórcze oraz z radioizotopami znajdującymi się w skorupie ziemskiej.

Skaly skorupy ziemskiej zawierają izotopy promieniotwórcze wchodzące w skład trzech szeregów promieniotwórcze, 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 otoczenia.

Zmienność obserwowanych parametrów pomiarowych zależy również od warunków meteorologicznych.

W 2016 roku na 7 stacjach badawczych zostały wykonane pomiary poziomu radioaktywności związane z obecnością izotopów, pochodzenia naturalnego i sztucznego, emitujących promieniowanie alfa oraz z obecnością izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta, w próbkach aerozoli.

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

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

3.2.1 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego emitujących promieniowanie alfa

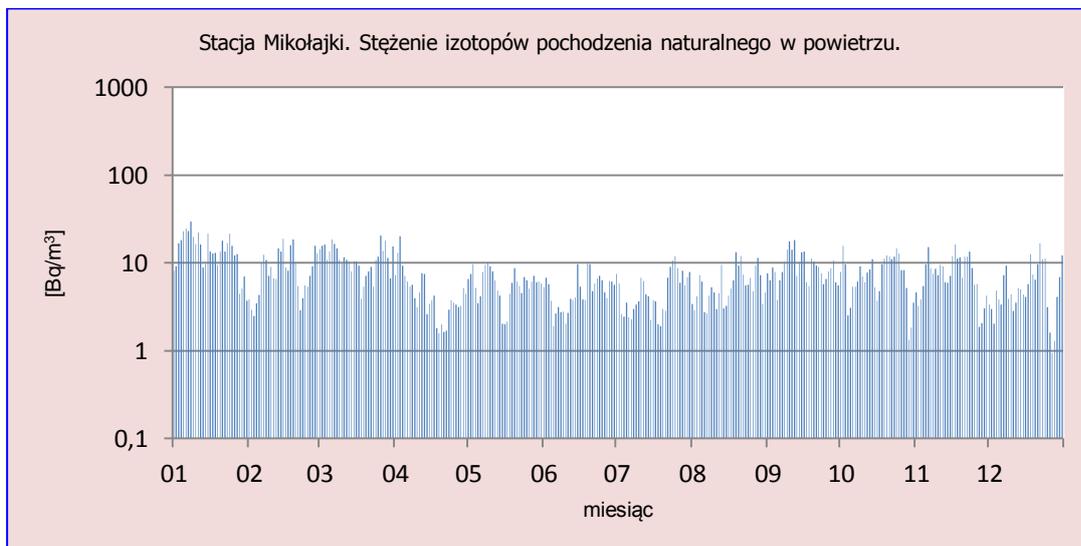
Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

Średnie miesięczne stężenia izotopów alfa promieniotwórczych w 2016 roku zmieniały się w szerokim zakresie (Tabela 3, Rys. 12-18). Minimalną średnią miesięczną wartością $2,4 \text{ Bq m}^{-3}$ charakteryzowały się aerozole zebrane w kwietniu na stacji Świnoujście, gdzie najwyższa uzyskana wartość, odnotowana dla tej miejscowości w listopadzie, wynosiła $6,5 \text{ Bq m}^{-3}$. Najwyższe średnie miesięczne stężenie izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa ($25,9 \text{ Bq m}^{-3}$) odnotowano we wrześniu na stacji Legnica oraz w następnej kolejności w grudniu w Zakopanem ($23,4 \text{ Bq m}^{-3}$) oraz w styczniu w Mikołajkach ($14,9 \text{ Bq m}^{-3}$). Wartości średnich rocznych obliczonych na podstawie wartości dobowych czyli średnich z 365 dni dla każdej stacji mieściły się w zakresie od $4,0 \text{ Bq m}^{-3}$ (Świnoujście) do $11,2 \text{ Bq m}^{-3}$ (Zakopane).

Analizując miesięczne wartości średnie obliczone na podstawie danych z 7 stacji stwierdzono, że mniejsze stężenia w zakresie $5,2 \text{ Bq m}^{-3}$ do $6,8 \text{ Bq m}^{-3}$ występowały się od lutego do sierpnia, podczas gdy w okresie jesienno-zimowym (wrzesień – styczeń) średnie stężenia zmieniały się od $8,9 \text{ Bq m}^{-3}$ do $11,4 \text{ Bq m}^{-3}$.

Tabela 3. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach w 2016, Bq m⁻³.

Miesiąc	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	14,9	6,6	6,3	18,6	6,7	13,0	9,0	10,7
Luty	8,9	4,0	3,2	7,4	3,9	6,8	5,6	5,7
Marzec	11,6	4,3	3,2	8,5	3,7	6,7	6,0	6,3
Kwiecień	5,1	3,8	2,4	11,7	3,1	7,2	3,4	5,2
Maj	6,1	3,8	3,4	13,3	3,8	7,4	5,9	6,3
Czerwiec	5,0	4,1	3,2	14,4	3,8	7,6	7,7	6,6
Lipiec	5,2	3,8	2,6	10,9	3,8	6,9	6,8	5,7
Sierpień	5,9	4,4	3,3	13,5	4,5	8,2	8,0	6,8
Wrzesień	9,3	6,4	4,9	25,9	7,1	12,5	13,7	11,4
Październik	7,8	8,4	6,4	11,1	6,2	14,7	7,8	8,9
Listopad	7,9	9,2	6,5	11,1	5,1	19,3	6,7	9,4
Grudzień	5,9	9,1	b.d.	13,3	4,6	23,4	8,5	10,8
Maks. średnia miesięczna	14,9	9,2	6,5	25,9	7,1	23,4	13,7	
Min. średnia miesięczna	5	3,8	2,4	7,4	3,1	6,7	3,4	
Średnia roczna na podstawie wartości dobowych dla 2016r.	7,8	5,6	4,0	13,3	4,7	11,2	7,4	7,7



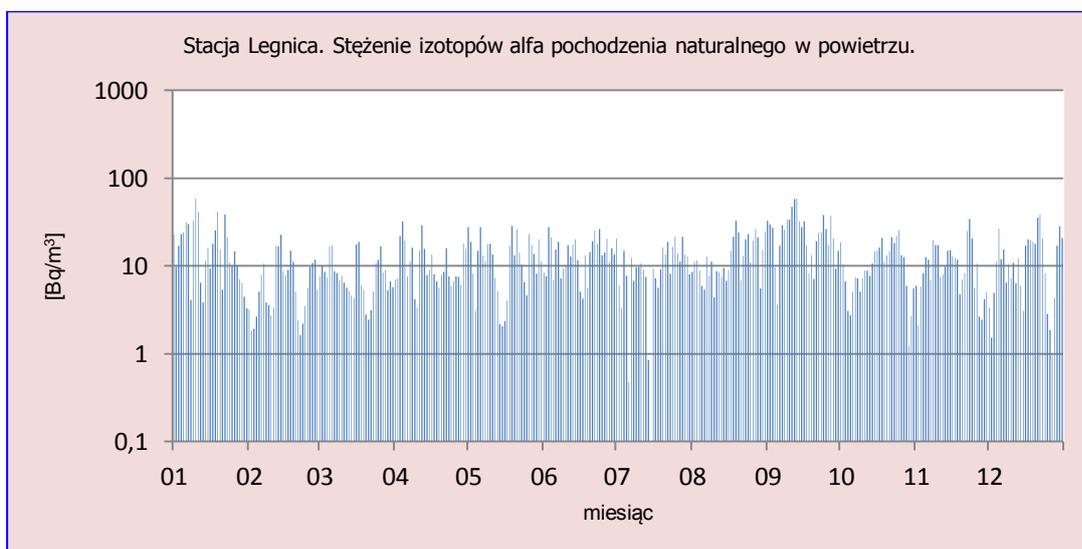
Rys.12. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Mikołajki w 2016 roku.



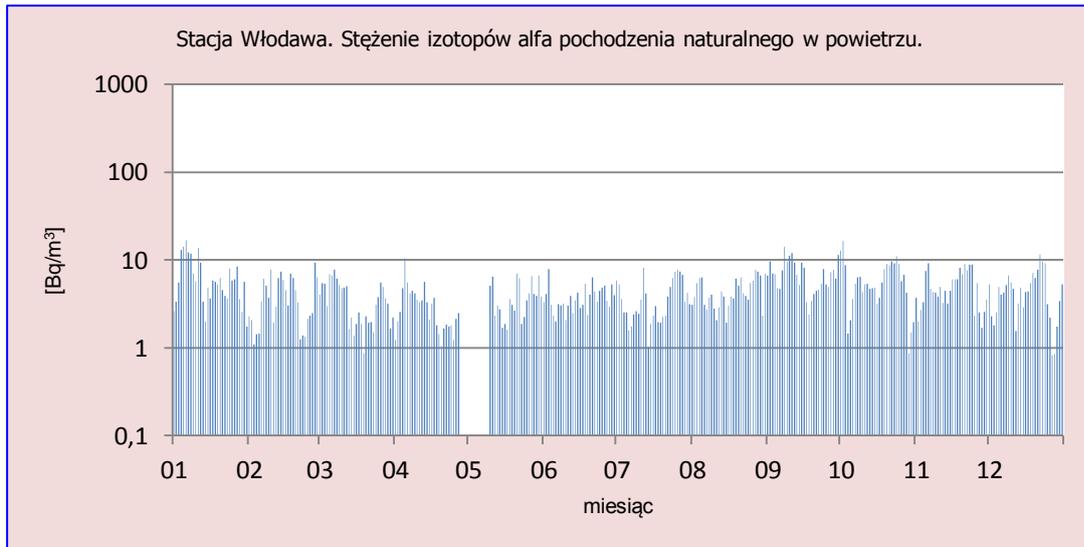
Rys.13. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp. w 2016 roku.



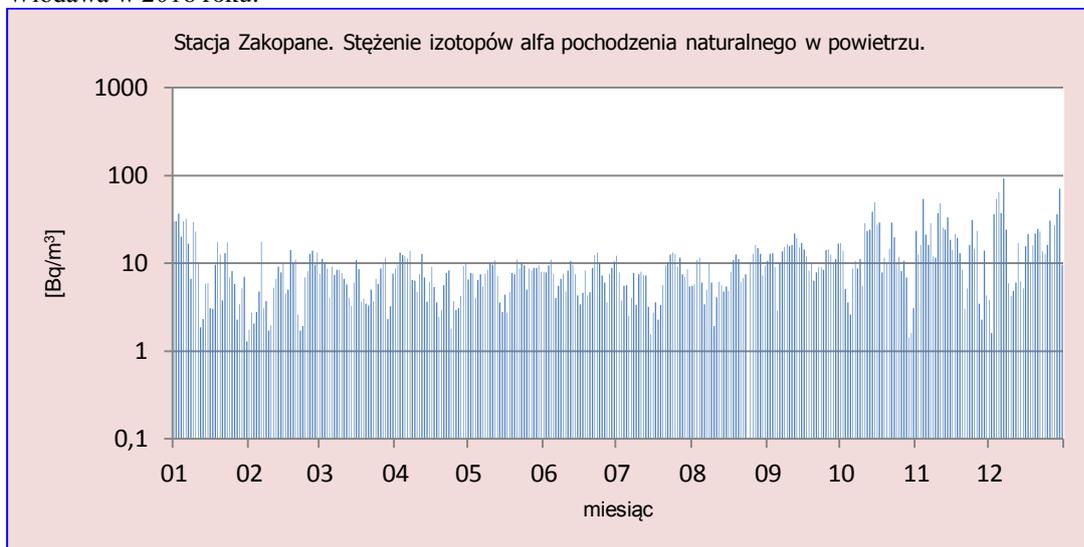
Rys.14. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Świnoujście w 2016 roku.



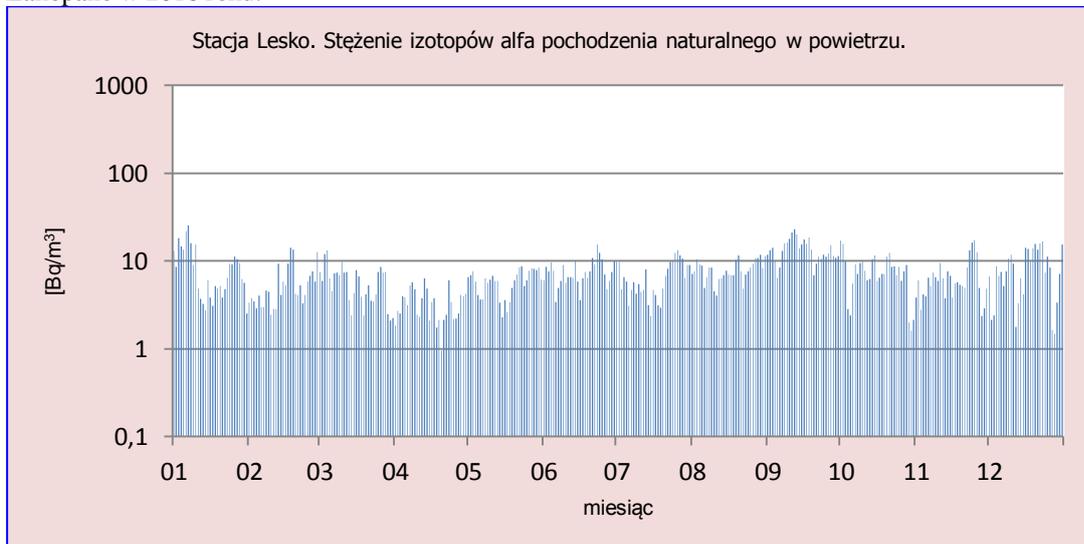
Rys.15. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Legnica w 2016 roku.



Rys.16. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Włodawa w 2016 roku.



Rys. 17. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Zakopane w 2016 roku.



Rys.18. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Lesko w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W roku 2016 średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolach zawieszonych w powietrzu było o $0,5 \text{ Bq m}^{-3}$ wyższe niż w roku ubiegłym i wynosiło $7,7 \text{ Bq m}^{-3}$ (Tabela 4). Zbliżone wartości otrzymano również w latach: 2003 -2007 oraz w 2011 r. W okresie ostatnich 16 lat nie obserwuje się jednoznacznych trendów zmian. Najniższe średnie stężenie ($4,9 \text{ Bq m}^{-3}$) charakteryzowało rok 2001, najwyższe natomiast ($8,6 \text{ Bq m}^{-3}$) wystąpiło w 2008 roku. Średnia obliczona na podstawie danych z okresu 2000 – 2016 wynosi $7,0 \text{ Bq m}^{-3}$. 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 – 2016, Bq m^{-3} .

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

3.2.2 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa

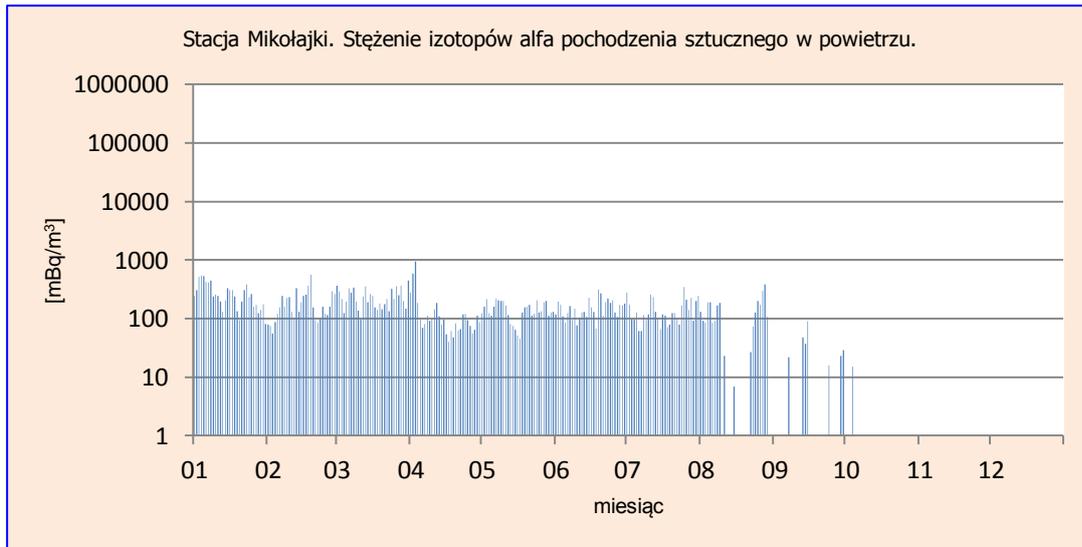
Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

Stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie alfa pochodzenia antropogenicznego zmieniały się w 2016 roku w stosunkowo szerokim zakresie od 0 do 0,293 Bq m⁻³. Miesięczne wartości minimalne zmieniały się w przedziale od 0 Bq m⁻³ do 0,021 Bq m⁻³, natomiast maksymalne w przedziale od 0,023 Bq m⁻³ do 0,293 Bq m⁻³ (Tabela 5, Rys. 19-25). Maksymalna średnia miesięczna wartość wystąpiła na stacji Zakopane w czerwcu, ale stosunkowo wysokie wartości pojawiły się również w Gorzowie Wielkopolskim (0,291 Bq m⁻³ we wrześniu) i Mikołajkach (0,270 Bq m⁻³ w styczniu).

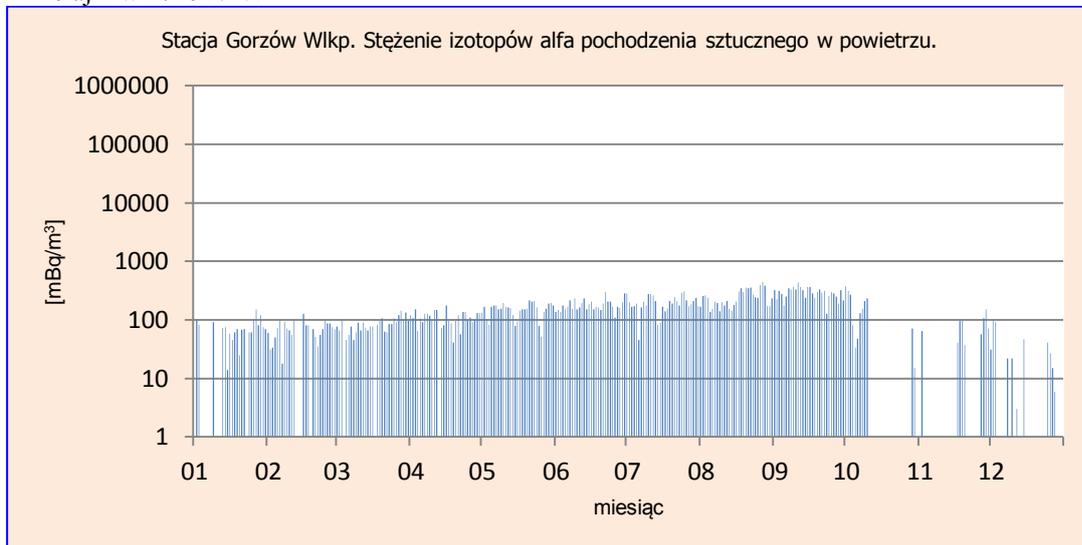
Średnia obliczona dla kolejnych miesięcy na podstawie danych ze wszystkich stacji zmieniała się w szerokim zakresie od 0,014 Bq m⁻³ – wartości wyznaczonej w grudniu, do 0,110 Bq m⁻³ – wartości wyznaczonej z danych w lipcu. Średnia roczna dobową, czyli średnia ze wszystkich dni, kiedy były uzyskane pomiary obliczona dla wszystkich stacji, utrzymuje się na poziomie 0,065 Bq m⁻³. 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 0,8 %.

Tabela 5. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w aerozolu w 2016 roku, Bq m⁻³.

Miesiąc	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Swinoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Średnia
Styczeń	0,270	0,050	0,001	0,010	0,017	0,050	0,002	0,057
Luty	0,183	0,060	0,002	0,023	0,044	0,069	0,011	0,056
Marzec	0,236	0,079	0,003	0,010	0,034	0,089	0,004	0,065
Kwiecień	0,144	0,106	0,013	0,062	0,066	0,142	0,015	0,078
Maj	0,142	0,151	0,015	0,018	0,048	0,203	0,007	0,083
Czerwiec	0,153	0,181	0,016	0,020	0,089	0,293	0,013	0,109
Lipiec	0,144	0,197	0,025	0,039	0,057	0,287	0,023	0,110
Sierpień	0,085	0,246	0,013	0,071	0,060	0,217	0,002	0,099
Wrzesień	0,009	0,291	0,010	0,041	0,034	0,021	0,000	0,058
Październik	0,000	0,072	0,002	0,063	0,044	0,027	0,005	0,030
Listopad	0,000	0,024	0,000	0,020	0,027	0,068	0,002	0,020
Grudzień	0,000	0,013	b.d.	0,016	0,020	0,032	0,001	0,014
Minimalna średnia miesięczna	0,000	0,013	0,000	0,010	0,017	0,021	0,000	
Maksymalna średnia miesięczna	0,270	0,291	0,025	0,071	0,089	0,293	0,023	
Średnia roczna na podstawie wartości dobowych dla 2016r.	0,114	0,123	0,010	0,033	0,045	0,125	0,007	0,065



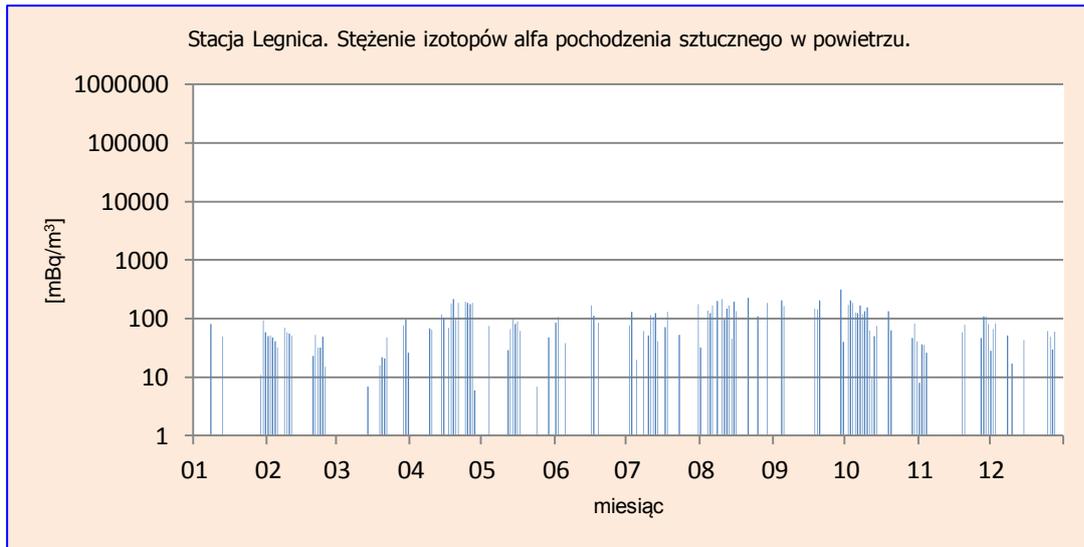
Rys.19. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Mikołajki w 2016 roku.



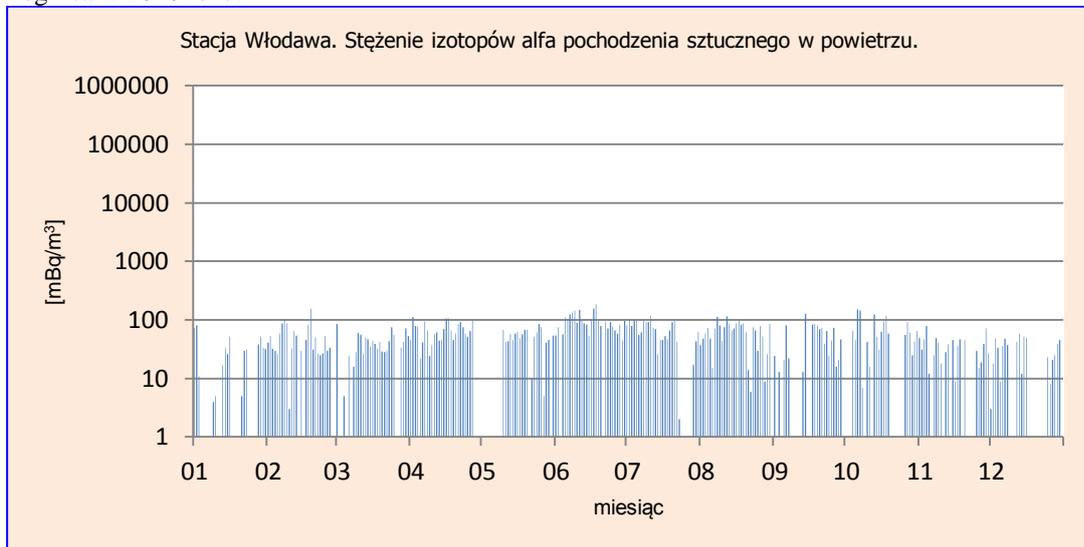
Rys.20. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp. w 2016 roku.



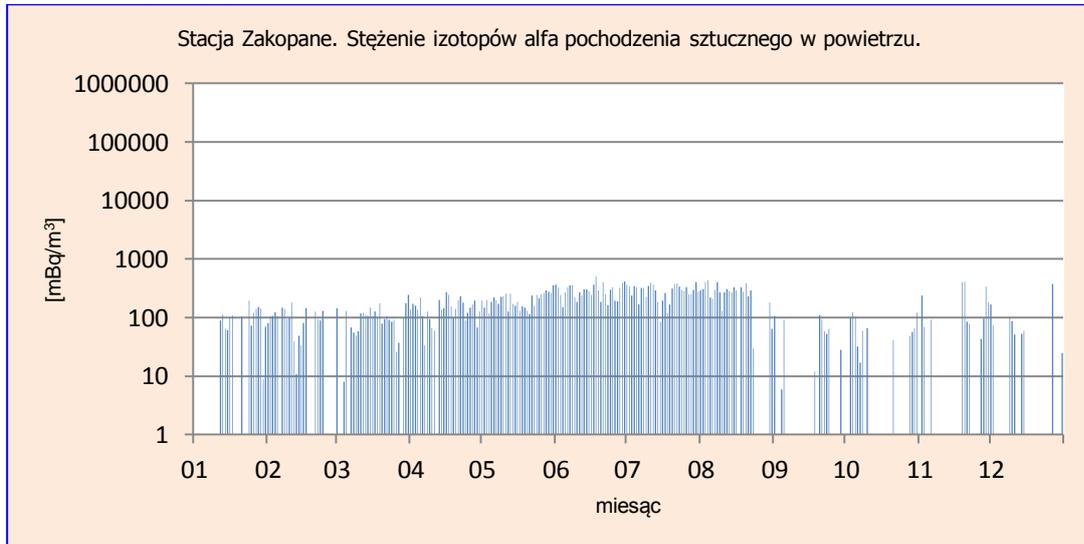
Rys. 21. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Świnoujście w roku 2016.



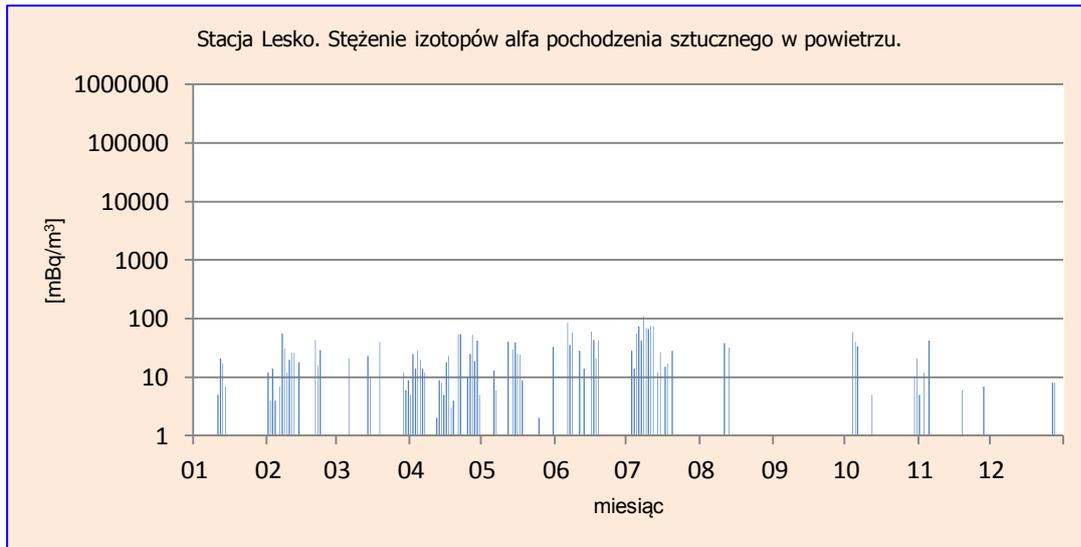
Rys.22. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Legnica w 2016 roku.



Rys. 23. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Włodawa w 2016 roku.



Rys.24. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Zakopane w 2016 roku.



Rys.25. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w 2016 roku wyniosło $0,065 \text{ Bq m}^{-3}$ i było prawie 13% niższe niż w roku poprzednim. Średnie stężenie wyznaczone dla okresu 2000 – 2016 wyniosło $0,031 \text{ Bq m}^{-3}$ i mieściło się w przedziale od $0,004 \text{ Bq m}^{-3}$ (2001) do $0,074 \text{ Bq m}^{-3}$ (2015) (Tabela 6).

Tabela 6. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa pochodzenia sztucznego w latach 2000 – 2016, Bq m^{-3}

Rok	Średnie roczne stężenie
2000	0,023
2001	0,004
2002	0,005
2003	0,015
2004	0,016
2005	0,019
2006	0,029
2007	0,025
2008	0,034
2009	0,040
2010	0,039
2011	0,039
2012	0,029
2013	0,033
2014	0,030
2015	0,074
2016	0,065
Średnia	0,031
Maksymalna	0,074
Minimalna	0,004

3.2.3 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta

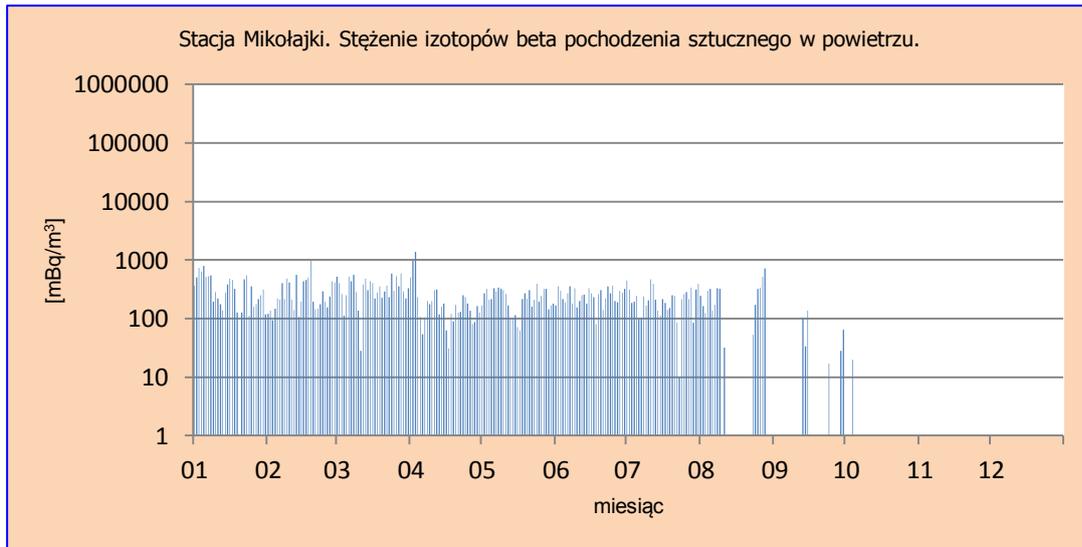
Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

Średnie wartości stężeń izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta mieściły się w zakresie od 0 Bq m⁻³ - średniej miesięcznej zanotowanej w listopadzie i grudniu na stacji Mikołajki do 0,885 Bq m⁻³ charakterystycznej dla Gorzowa Wielkopolskiego we wrześniu – (Tabela 7, Rys. 26-32).

Najwyższe średnie wartości roczne obliczone na podstawie średnich uzyskanych dla wszystkich miesięcy zarejestrowano na stacjach: Gorzów Wielkopolski (0,470 Bq m⁻³) i Zakopane (0,336 Bq m⁻³). Najniższą wartość zanotowano we Włodawie 0,099 Bq m⁻³, która była 2,5 razy niższa niż średnia dla całej Polski. Średnie stężenia wyznaczone dla poszczególnych miesięcy z wyników otrzymanych na 7 stacjach pomiarowych mieściło się w zakresie od 0,086 Bq m⁻³ (grudzień) do 0,361 Bq m⁻³ (lipiec). Najwyższe wyniki otrzymano w miesiącach od kwietnia do sierpnia. Średnia dla tego okresu wyniosła 0,328 Bq m⁻³ i była prawie dwukrotnie wyższa niż średnia dla pozostałych miesięcy – 0,173 Bq m⁻³. Taki układ sugeruje zależność aktywności beta w aerozolu od sezonu, wskazując na większe stężenia w miesiącach letnich związane z większymi opadami powodującym zwiększone tempo wymywania aerozoli.

Tabela 7. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu w 2016 roku, Bq m⁻³.

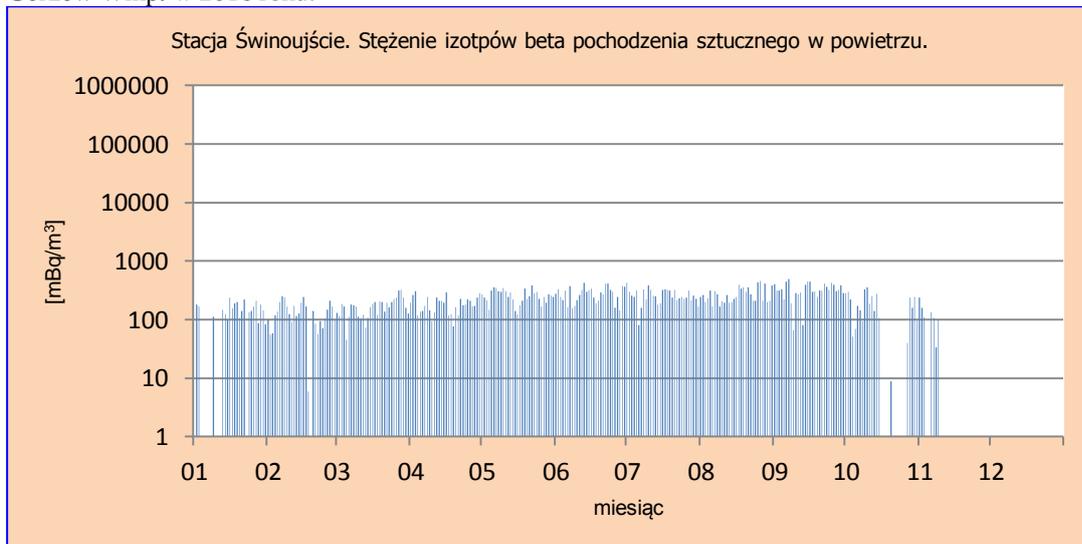
Miesiąc	Mikołajki	Gorzów Wlkp.	Swinoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Srednia
Styczeń	0,341	0,264	0,104	0,065	0,129	0,162	0,045	0,159
Luty	0,291	0,302	0,130	0,163	0,207	0,210	0,123	0,204
Marzec	0,346	0,376	0,168	0,156	0,187	0,298	0,058	0,227
Kwiecień	0,233	0,443	0,186	0,242	0,237	0,407	0,050	0,257
Maj	0,226	0,581	0,257	0,126	0,236	0,538	0,153	0,303
Czerwiec	0,252	0,678	0,279	0,141	0,331	0,674	0,171	0,361
Lipiec	0,223	0,652	0,261	0,277	0,238	0,693	0,184	0,361
Sierpień	0,138	0,780	0,273	0,320	0,290	0,570	0,144	0,359
Wrzesień	0,013	0,885	0,323	0,168	0,197	0,115	0,022	0,246
Październik	0,001	0,287	0,121	0,309	0,184	0,115	0,103	0,160
Listopad	0,000	0,227	0,098	0,150	0,159	0,154	0,110	0,128
Grudzień	0,000	0,168	b.d.	0,099	0,122	0,099	0,026	0,086
Minimalna średnia miesięczna	0,000	0,168	0,098	0,065	0,122	0,099	0,022	
Maksymalna średnia miesięczna	0,346	0,885	0,323	0,320	0,331	0,693	0,184	
Średnia roczna na podstawie wartości dobowych dla 2016r.	0,172	0,470	0,207	0,185	0,209	0,336	0,099	0,240



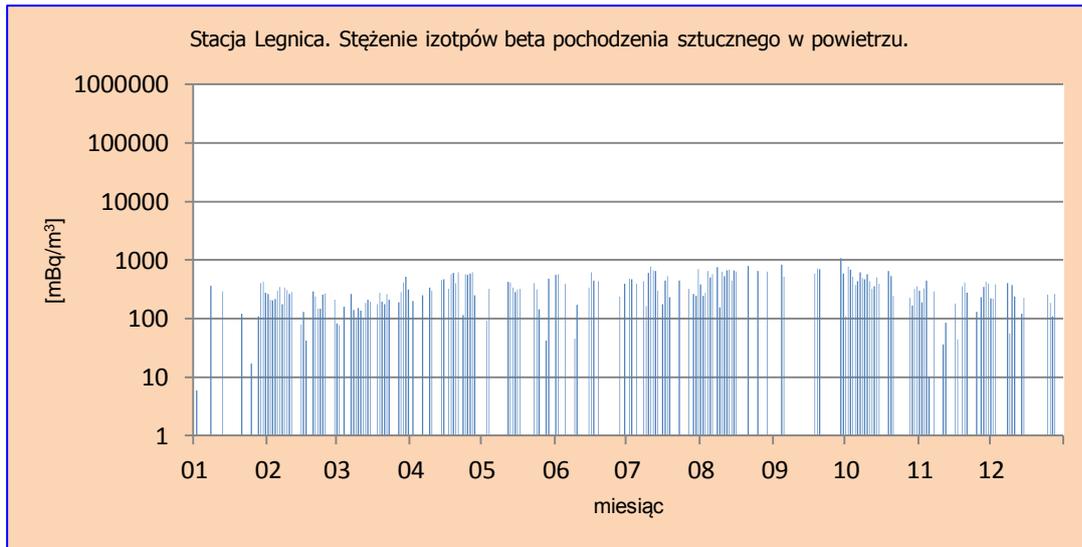
Rys.26. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Mikołajki w 2016 roku.



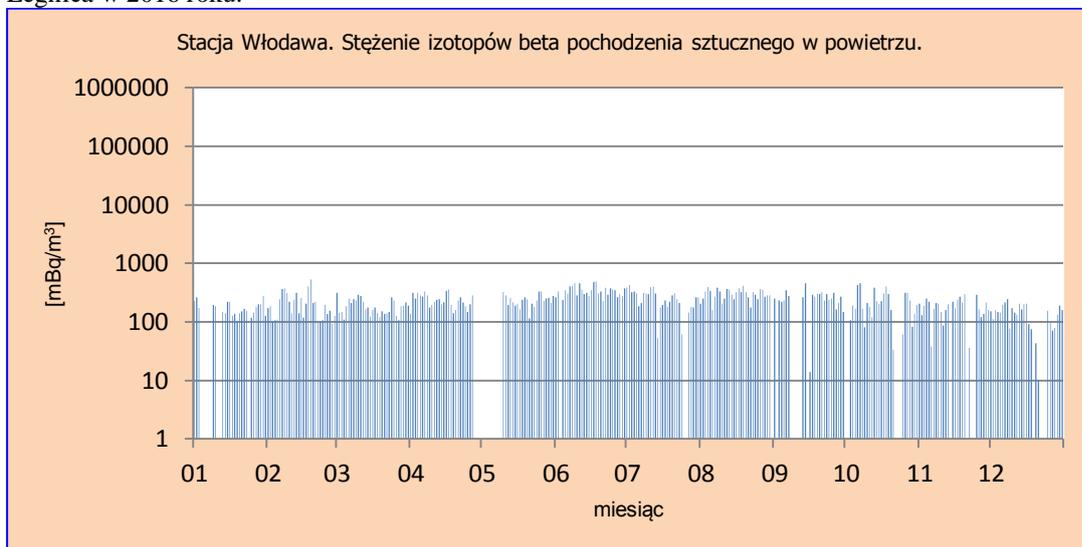
Rys.27. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Gorzów Wlkp. w 2016 roku.



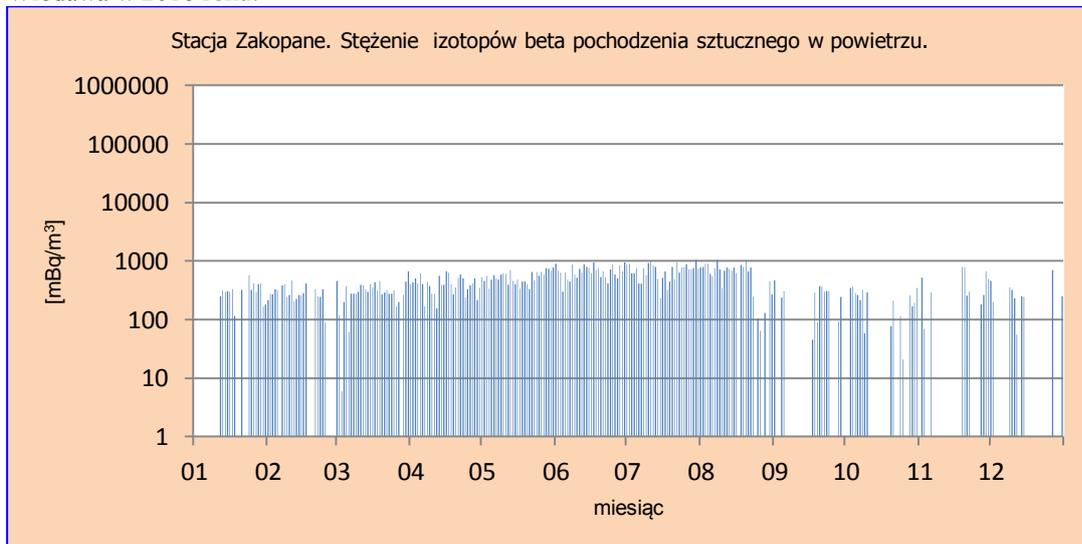
Rys.28. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Świnoujście w 2016 roku.



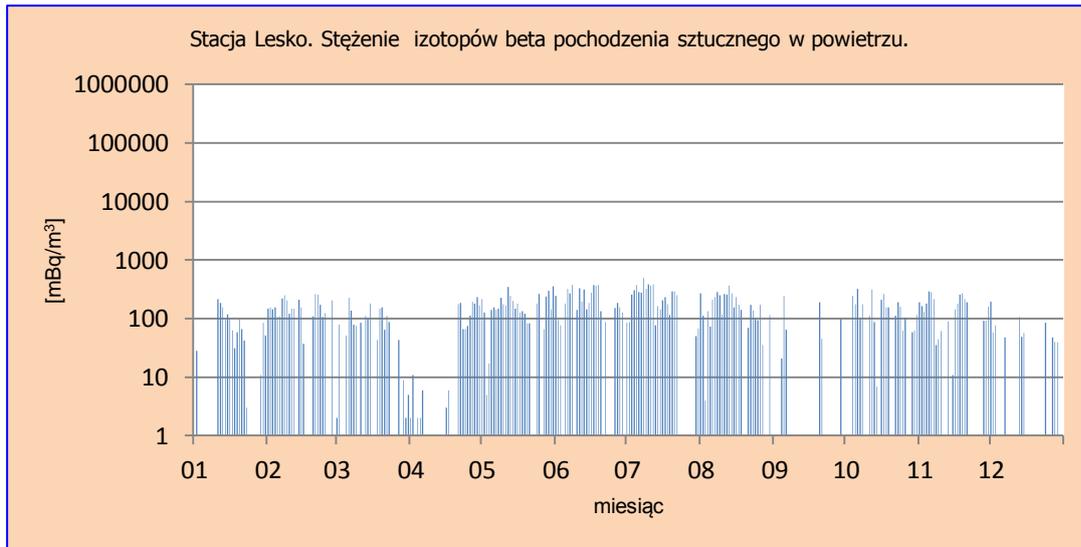
Rys.29. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Legnica w 2016 roku.



Rys.30. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Włodawa w 2016 roku.



Rys.31. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Zakopane w 2016 roku.



Rys.32. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W 2016 roku średnie roczne stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta wyniosło $0,240 \text{ Bq m}^{-3}$ i było porównywalna z wartością z poprzedniego roku - $0,241 \text{ Bq m}^{-3}$. Średnie roczne stężenia uzyskane w latach 2015 i 2016 były jednymi z najwyższych spośród wszystkich średnich odnotowanych w okresie badań 2000 - 2016. Wartości te są ponad czternastokrotnie wyższe niż minimalne średnie stężenie przypadające na rok 2001. Należy jednak podkreślić, że aktywności te można uznać za niskie pozostające na poziomie tła i tym samym nie stanowiące zagrożenia. Średnia aktywność promieniotwórcza związana z obecnością izotopów emitujących promieniowanie beta w aerozolu w badanym okresie wyniosła $0,086 \text{ Bq m}^{-3}$ (Tabela 8).

Tabela 8. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta w latach 2000 – 2016, Bq m^{-3}

Rok	Średnie roczne stężenie		
2000	0,034		
2001	0,017		
2002	0,034		
2003	0,040		
2004	0,035		
2005	0,056		
2006	0,060		
2007	0,048		
2008	0,037		
2009	0,058		
2010	0,076		
2011	0,083		
2012	0,160		
2013	0,113		
2014	0,137	Średnia	0,086
2015	0,241	Maksymalna	0,241
2016	0,240	Minimalna	0,017

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.

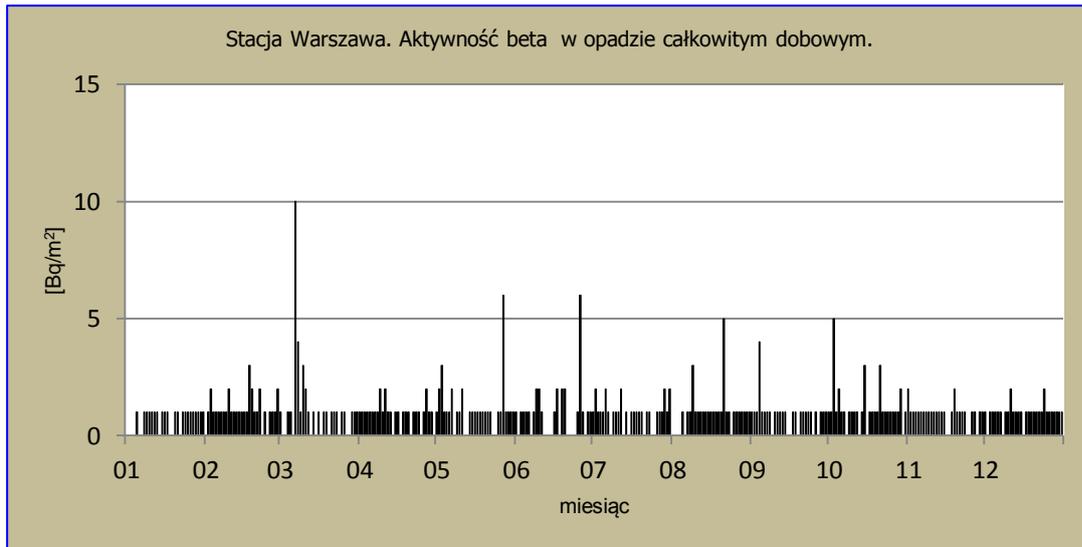
Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

W 2016 roku maksymalne wartości dobowe zmieniały się w szerokim zakresie od 3,0 Bq m⁻² na stacjach Gdynia i Świnoujście do 10,0 Bq m⁻² - Warszawa (Tabela 9, Rys 33-41). W porównaniu z zeszłym rokiem najwyższa maksymalna wartość dobowa w 2016 roku była aż o 9,0 Bq m⁻² niższa od wartości dobowej odzwierciedlającej poziom radioaktywności beta w Lesku w 2015 roku (19,0 Bq m⁻²). Minimalne dobowe stężenia izotopów beta promieniotwórczych w próbkach całkowitego opadu dobowego na wszystkich stacjach pomiarowych przyjmowały wartości na poziomie zera. Średnia suma wyznaczona na podstawie wartości dobowych dla całego roku 2016 wynosiła 312,2 Bq m⁻² i była porównywalna z sumą wyznaczoną dla roku 2015 (312,8 Bq m⁻²). Miesięczne średnie aktywności beta wyznaczone na podstawie pomiarów dobowych zmieniały się w zakresie 0,1 Bq m⁻² (Gdynia, Świnoujście) do 1,6 Bq m⁻² dla Zakopanego.

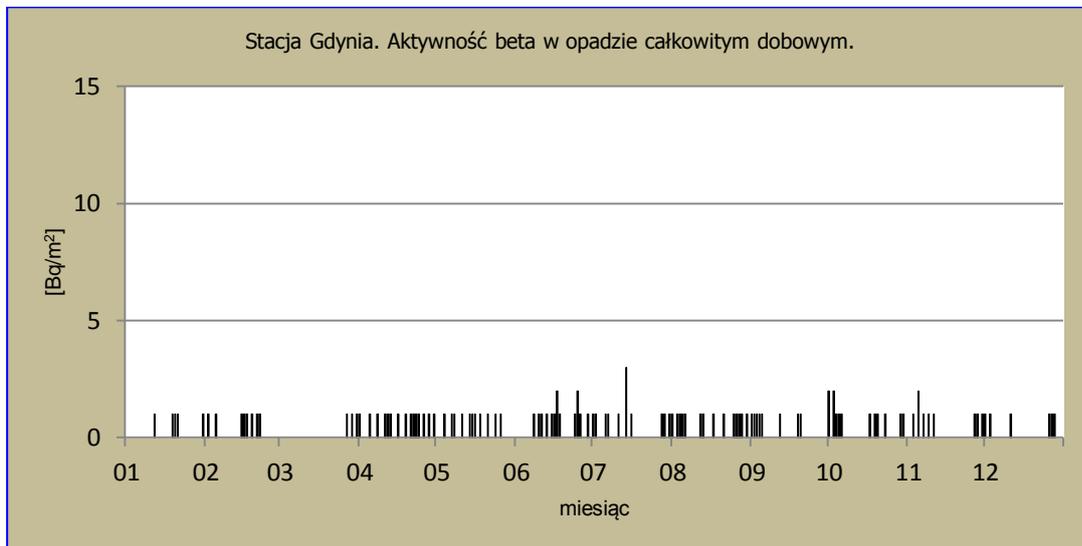
Tabela 9. Średnie miesięczne stężenia izotopów beta w dobowym opadzie całkowitym w 2016 roku, Bq m⁻².

Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Poznań	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Srednia
Styczeń	0,7	0,2	0,9	0,6	0,6	1,1	0,9	0,7	0,9	0,7
Luty	1,1	0,3	1,1	0,7	0,8	1,3	1,0	1,0	0,7	0,9
Marzec	1,2	0,1	0,9	0,7	0,1	1,0	0,9	0,9	0,6	0,7
Kwiecień	0,9	0,5	1,2	0,6	0,4	1,5	1,2	1,1	1,1	0,9
Maj	1,2	0,4	1,2	0,7	0,3	1,5	0,9	1,2	0,8	0,9
Czerwiec	0,9	0,5	1,2	0,8	0,5	0,9	1,2	1,2	0,9	0,9
Lipiec	1,0	0,4	1,3	0,8	0,4	1,4	1,2	1,6	1,5	1,1
Sierpień	1,0	0,5	1,1	0,5	0,3	1,3	0,9	1,4	1,0	0,9
Wrzesień	0,9	0,3	1,0	0,5	0,4	1,5	0,9	1,1	0,7	0,8
Październik	1,2	0,4	1,4	0,5	0,5	0,8	1,0	1,1	1,2	0,9
Listopad	0,9	0,3	1,1	0,6	0,3	0,9	0,9	1,1	0,8	0,8
Grudzień	1,0	0,2	1,0	0,4	0,4	1,1	0,9	1,0	1,0	0,8
Maksymalna średnia miesięczna	1,2	0,5	1,4	0,8	0,8	1,5	1,2	1,6	1,5	1,1
Minimalna średnia miesięczna	0,7	0,1	0,9	0,4	0,1	0,8	0,9	0,7	0,6	0,7
Maksymalna wartość dobową	10,0	3,0	5,0	4,0	3,0	4,0	6,0	7,0	4,0	5,1
Minimalna wartość dobową	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Średnia wartość roczna	1,0	0,3	1,1	0,6	0,4	1,2	1,0	1,1	0,9	0,9
Suma roczna na podstawie danych. dob.	312,2									

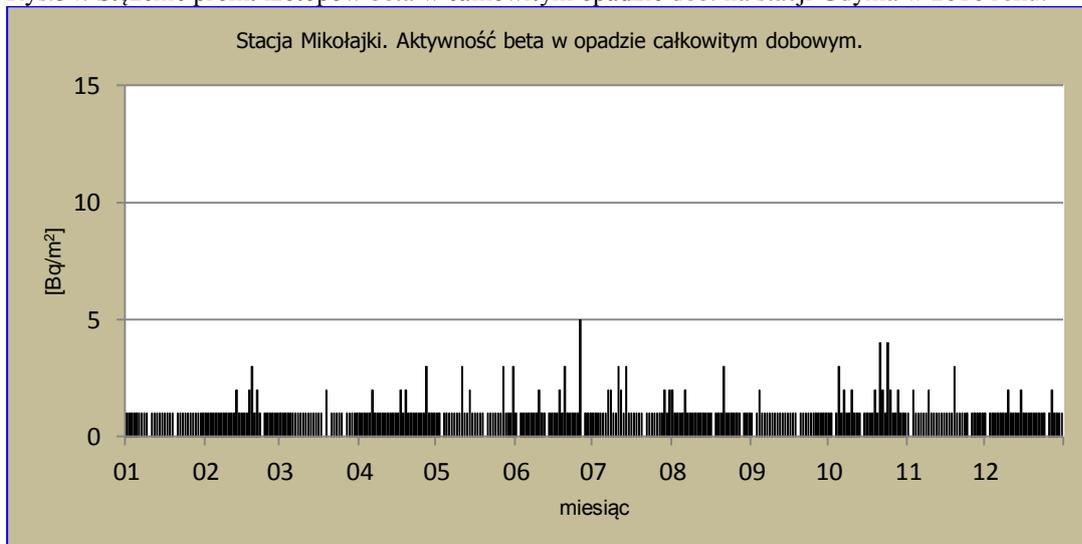
Porównując średnie wartości roczne wyznaczone na podstawie danych dobowych w 2016 roku, najmniejszy dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta wystąpił w Gdyni (0,3 Bq m⁻²) i Świnoujściu (0,4 Bq m⁻²) co mogło mieć związek z częstszymi i bardziej intensywnymi wiatrami występującymi w strefie nadmorskiej. Największy dopływ izotopów promieniotwórczych beta odnotowano w Legnicy (1,2 Bq m⁻²) oraz w Mikołajkach i Zakopanem (1,1 Bq m⁻²). Średnie stężenia promieniotwórcze izotopów beta w poszczególnych miesiącach wyznaczone dla obszaru całej Polski (obliczone z wyników dobowych uzyskanych na wszystkich stacjach) zmieniały się w bardzo wąskim zakresie od 0,7 Bq m⁻² (styczeń) do 0,9 Bq m⁻² (lipiec). Średnia roczna dla wszystkich stacji w 2016 roku (0,9 Bq m⁻²) była taka sama jak w 2015.



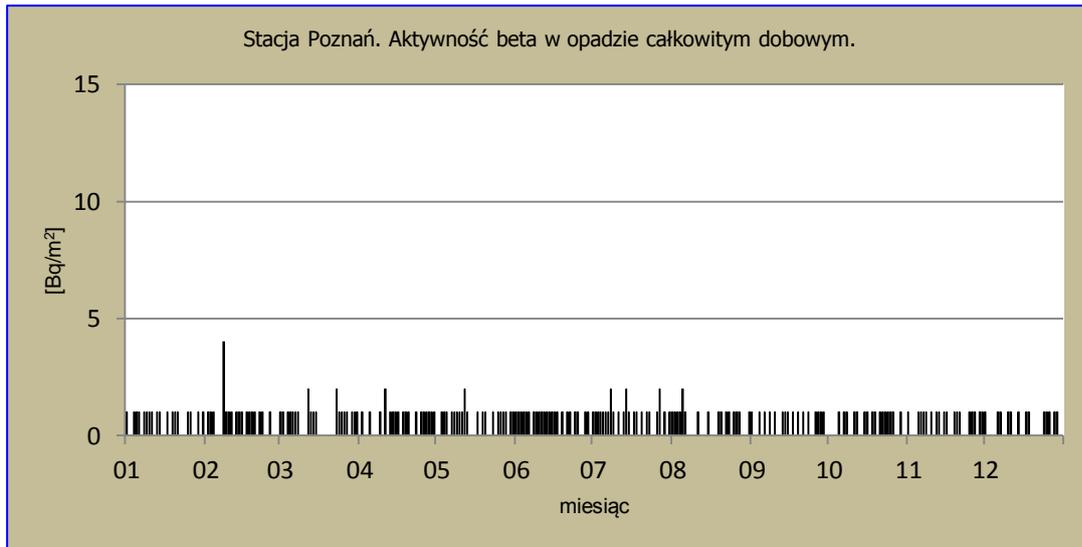
Rys.33. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Warszawa w 2016 roku.



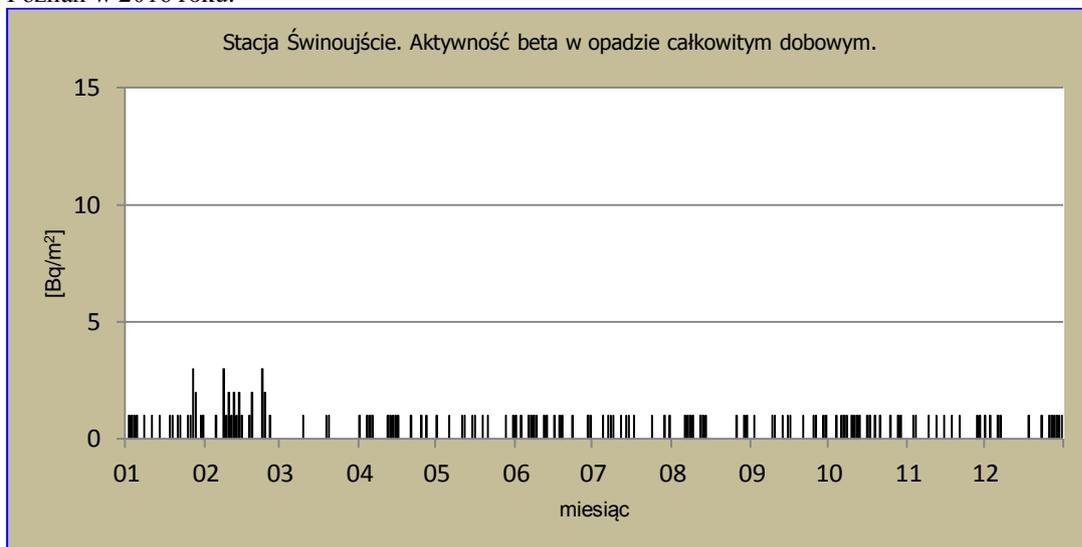
Rys.34. Stężenie prom. izotopów beta w całkowitym opadzie dob. na stacji Gdynia w 2016 roku.



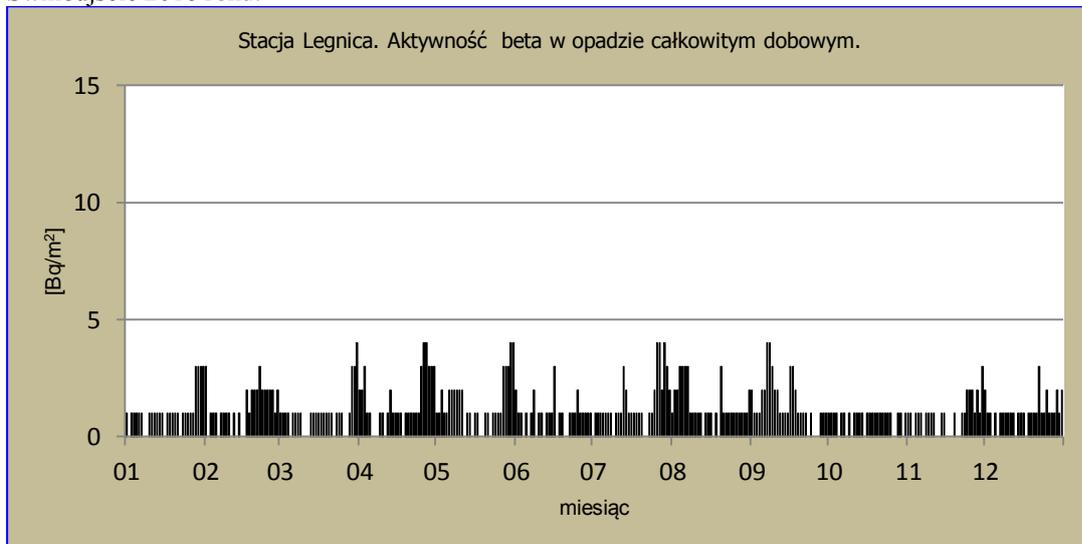
Rys.35. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Mikołajki w 2016 roku.



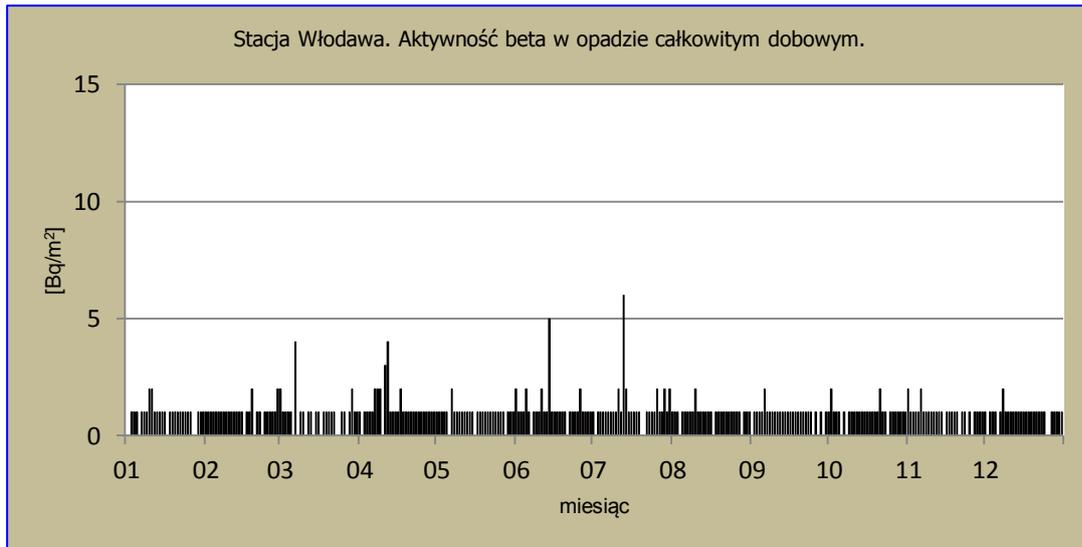
Rys.36. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Poznań w 2016 roku.



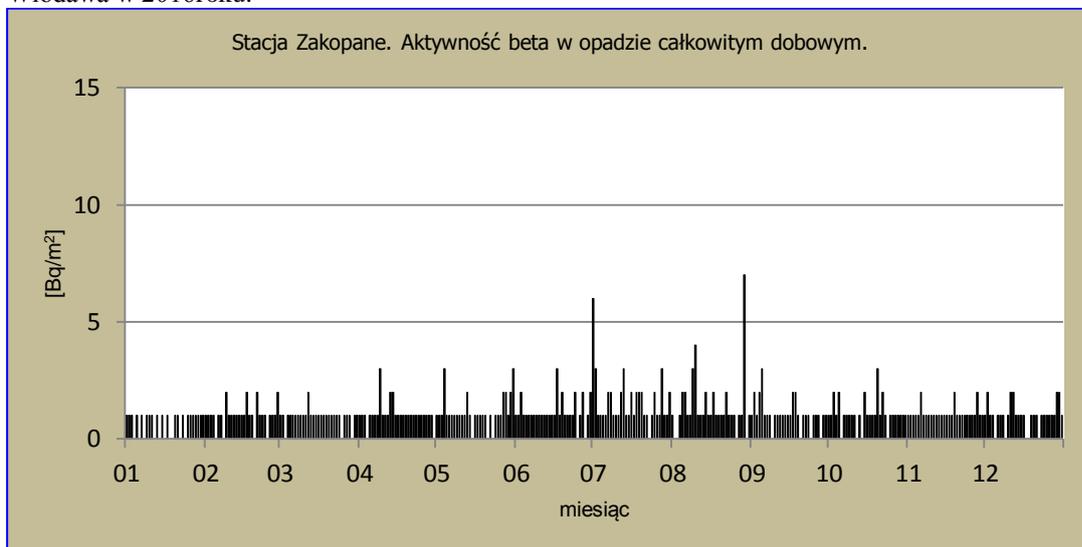
Rys.37. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Świnoujście 2016 roku.



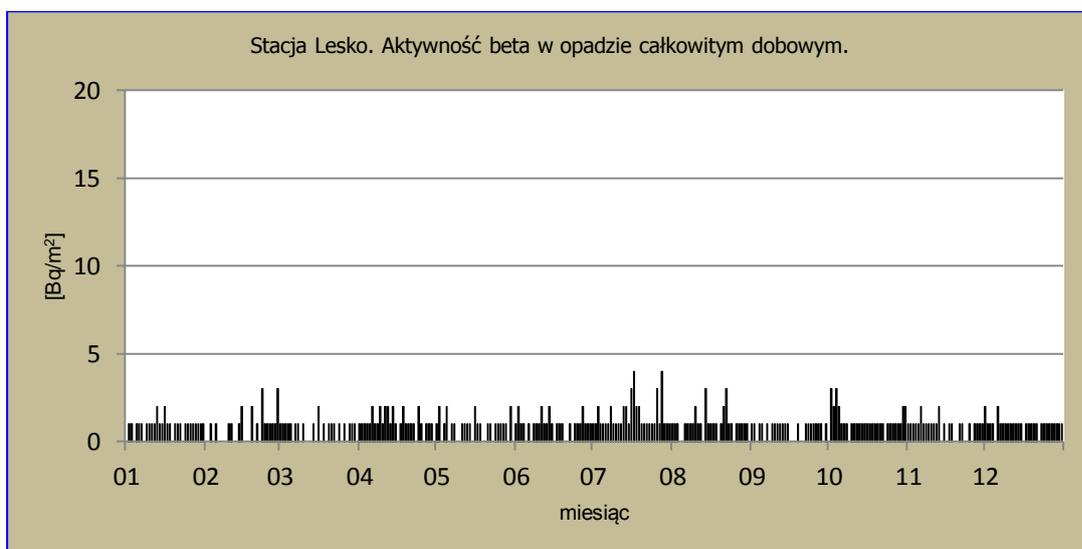
Rys.38. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Legnica w 2016 roku.



Rys.39. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Włodawa w 2016 roku.



Rys.40. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Zakopane w 2016 roku.



Rys.41. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Lesko w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Aktywność beta w całkowitym opadzie dobowym dla całego obszaru Polski, obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wyznaczonych stacjach w 2016 roku ($0,31 \text{ kBq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$) była taka sama jak w latach 2006, 2007, 2013 i 2015. Wartość średnia obliczona dla okresu 2000-2016 utrzymuje się na poziomie $0,32 \text{ kBq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ (Tabela 10).

Tabela 10. Średnia sumaryczna aktywność beta całkowitego opadu dobowego dla sieci 9 stacji w latach 2000 – 2016, $\text{kBq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$

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

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.

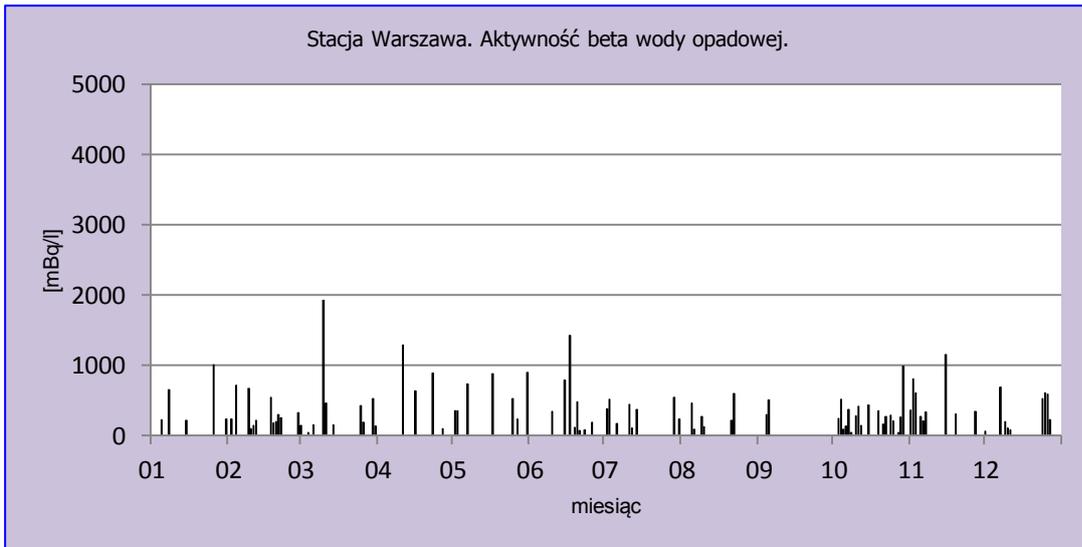
Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

W 2016 roku maksymalna wartość dobowej aktywności beta wody opadowej wahała się w przedziale od 776 mBq l⁻¹ (Gdynia) do 2670 mBq l⁻¹ (Legnica) (Tabela 11, Rys. 42-50). Minimalne dobowe wartości zmieniały się w zakresie od zaledwie 6 mBq l⁻¹ w Świnoujściu do 54 mBq l⁻¹ we Włodawie. Średnia miesięczna aktywność beta wody opadowej wahała się od 80,1 mBq l⁻¹ w Gdyni do 770,7 mBq l⁻¹ w Legnicy. Średnia miesięczna aktywność wody opadowej była najwyższa w kwietniu 415 mBq l⁻¹ a najniższa w grudniu i październiku – 268 mBq l⁻¹.

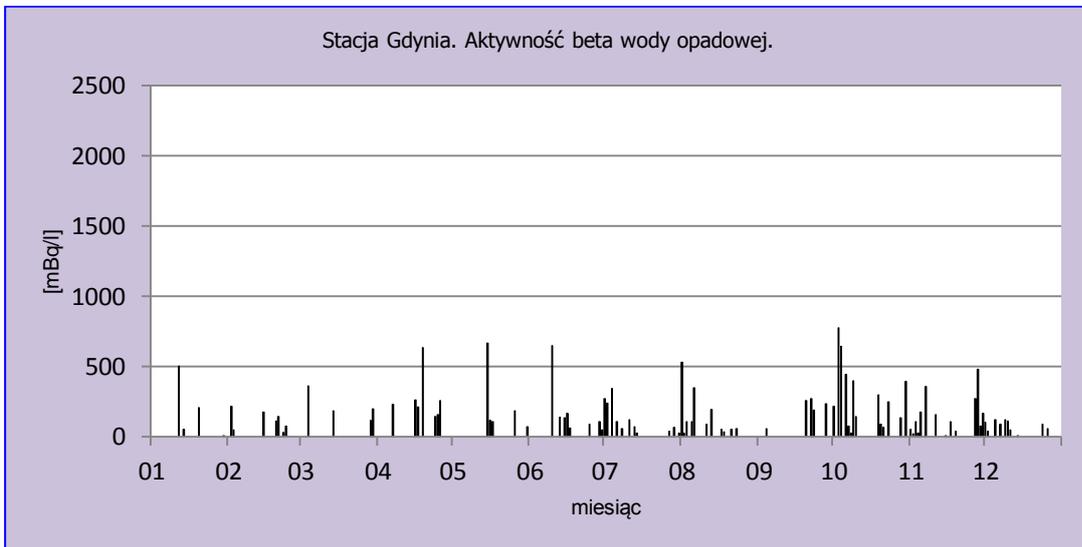
W 2016 roku nie stwierdzono znaczących różnic pomiędzy średnimi aktywnościami beta wyznaczonymi dla poszczególnych miesięcy. Średnia roczna aktywności opadowej obliczona na podstawie danych ze wszystkich stacji pomiarowych w 2015 była o 26 mBq l⁻¹ wyższa niż tegoroczna.

Tabela 11. Średnie miesięczne wartości aktywności beta wody opadowej w 2016 roku, mBq l⁻¹.

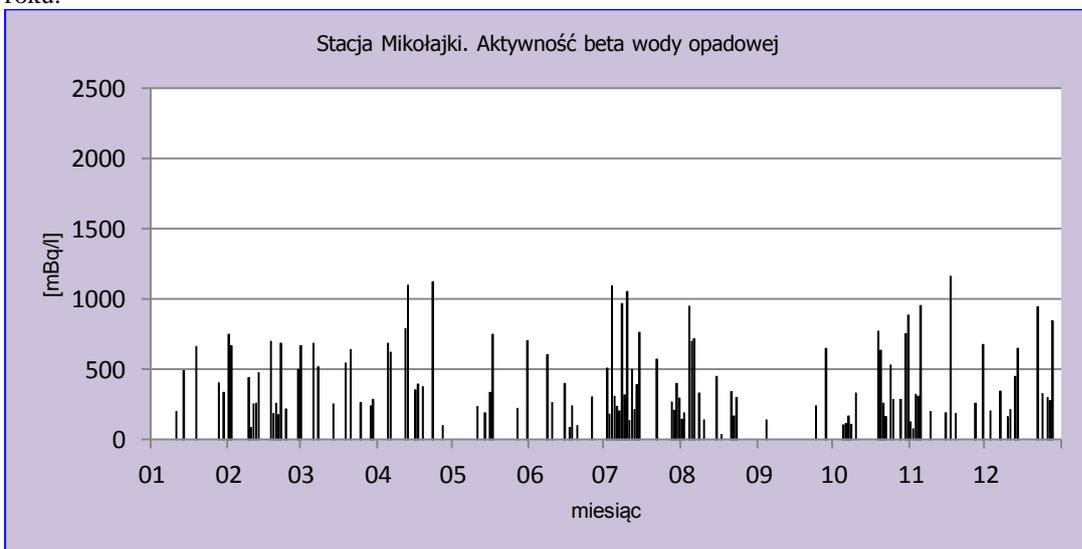
Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Poznań	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko	Srednia
Styczeń	470,0	194,3	418,4	320,4	106,3	452,2	383,9	410,9	526,6	365
Luty	324,8	116,4	404,4	259,4	448,0	395,1	337,5	325,7	379,9	332
Marzec	418,8	217,5	456,2	242,7	88,5	583,9	496,7	447,1	292,3	360
Kwiecień	730,8	272,3	616,0	289,8	191,9	428,1	413,6	374,5	421,6	415
Maj	568,7	231,0	406,7	558,0	202,3	600,8	476,3	262,7	304,5	401
Czerwiec	437,6	175,9	285,3	197,0	103,4	328,5	638,9	471,6	322,1	329
Lipiec	348,3	126,3	453,4	211,1	131,5	770,7	224,2	283,9	326,1	319
Sierpień	296,7	147,3	373,3	294,7	114,4	396,6	643,5	296,9	201,7	307
Wrzesień	404,0	203,8	343,7	148,0	141,5	327,0	484,7	216,3	162,0	270
Październik	294,2	284,1	385,5	203,1	108,6	306,6	227,5	265,1	334,4	268
Listopad	489,3	147,3	405,5	254,4	85,2	463,8	414,5	314,5	315,3	321
Grudzień	343,8	80,1	429,2	275,8	91,7	322,6	316,8	216,4	338,5	268
Maksymalna średnia miesięczna	730,8	284,1	616,0	558,0	448,0	770,7	643,5	471,6	526,6	561
Minimalna średnia miesięczna	294,2	80,1	285,3	148,0	85,2	306,6	224,2	216,3	162,0	200
Maksymalna wartość dobową	1931,0	776,0	1164,0	1089,0	884,0	2670,0	1400,0	1592,0	1515,0	1447
Minimalna wartość dobową	45	7	38	32	6	27	54	17	43	30
Średnia roczna	398,0	178,0	421,2	265,1	135,2	451,1	400,7	322,8	342,6	324



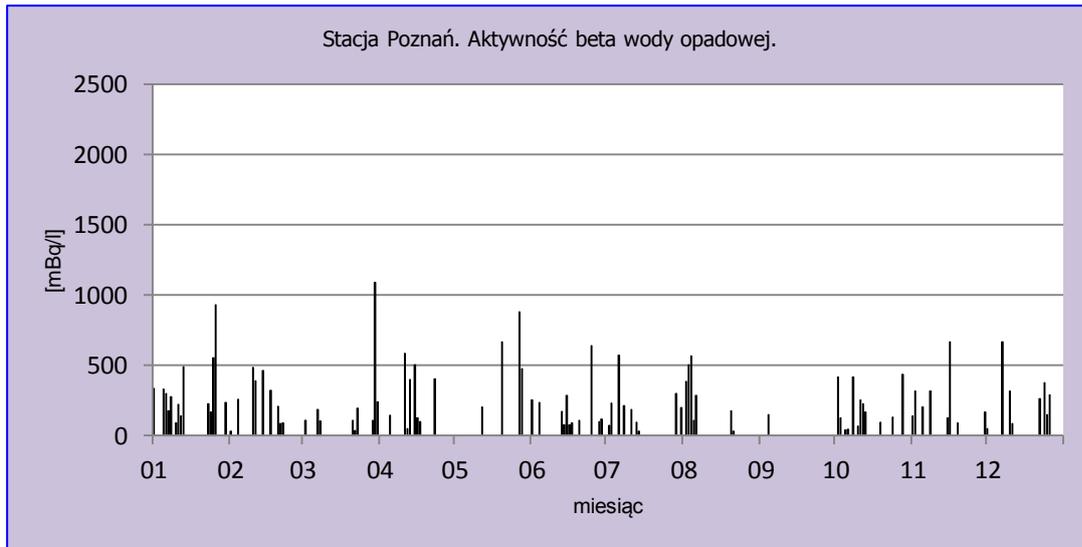
Rys.42. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Warszawa w 2016 roku.



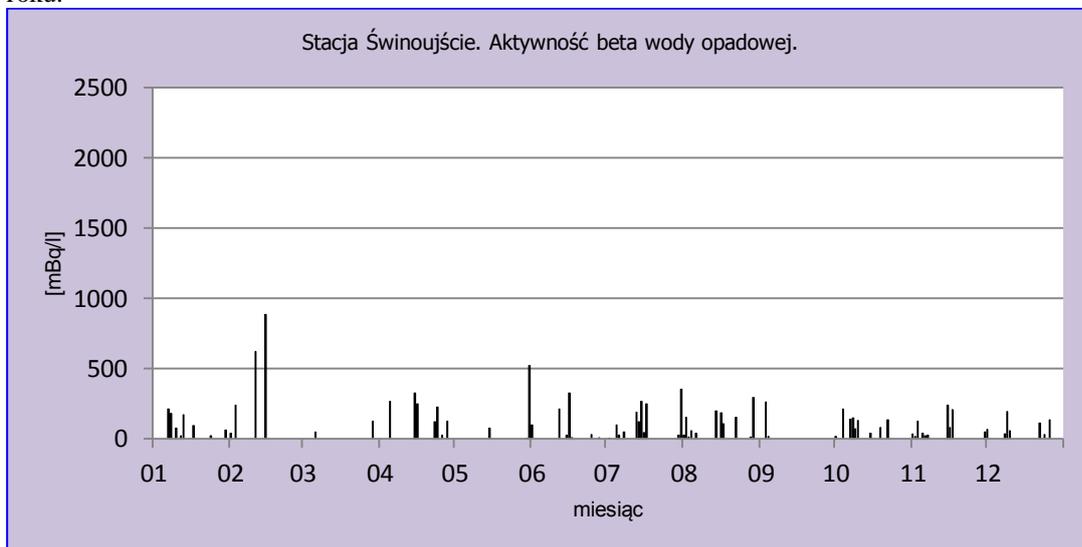
Rys.43. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Gdynia w 2016 roku.



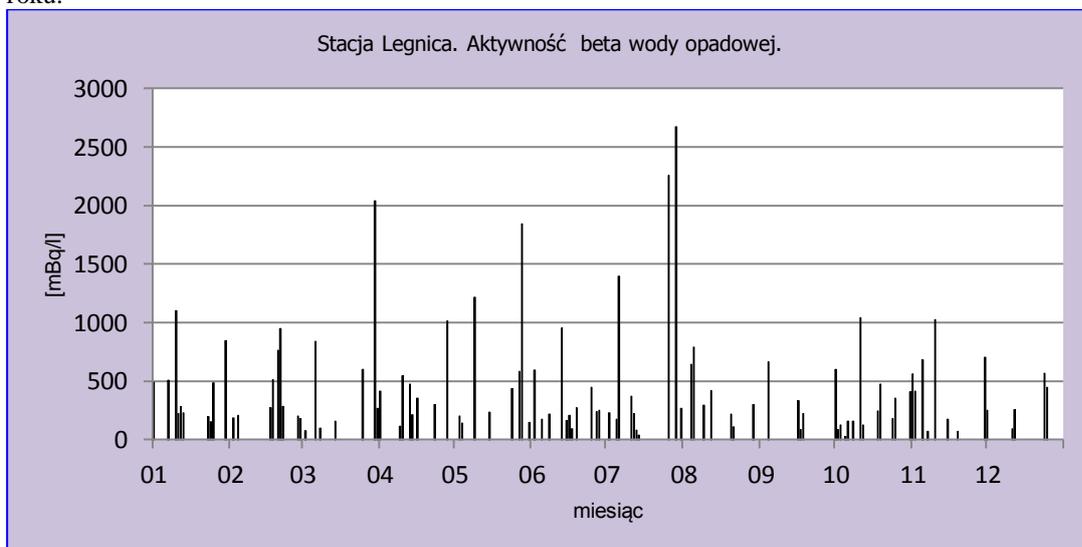
Rys.44. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Mikołajki w 2016 roku.



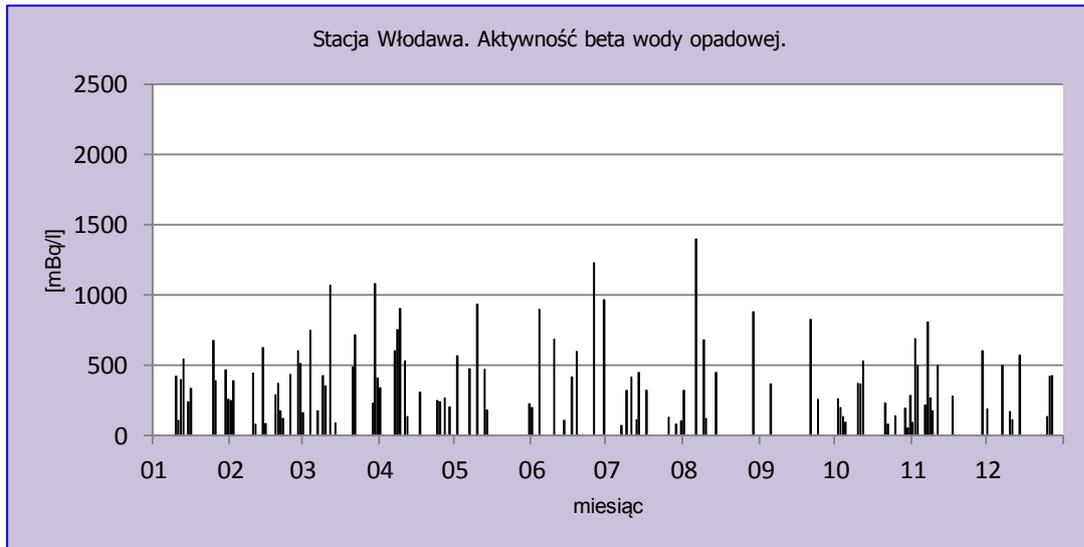
Rys.45. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Poznań w 2016 roku.



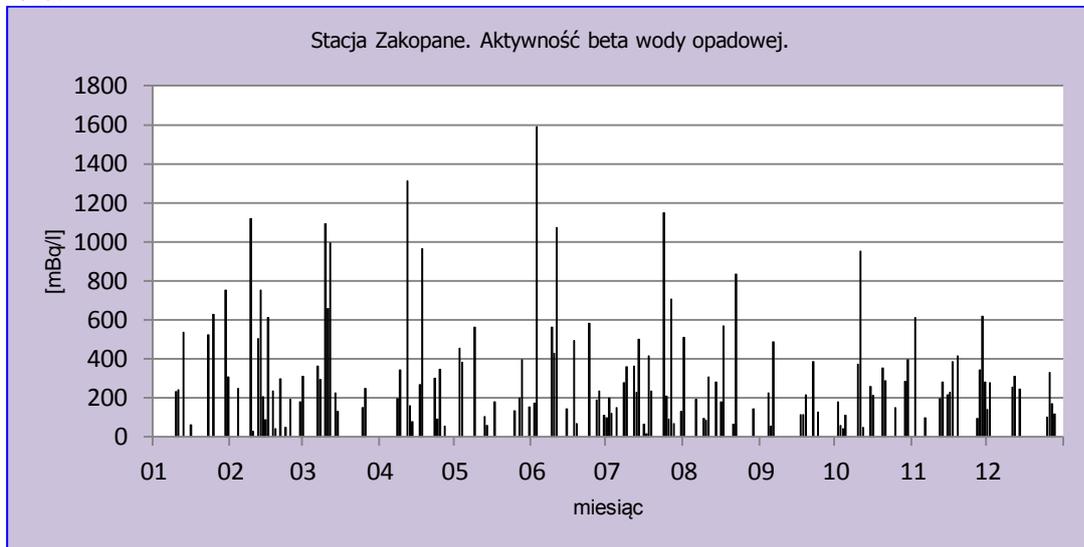
Rys.46. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Świnoujście w 2016 roku.



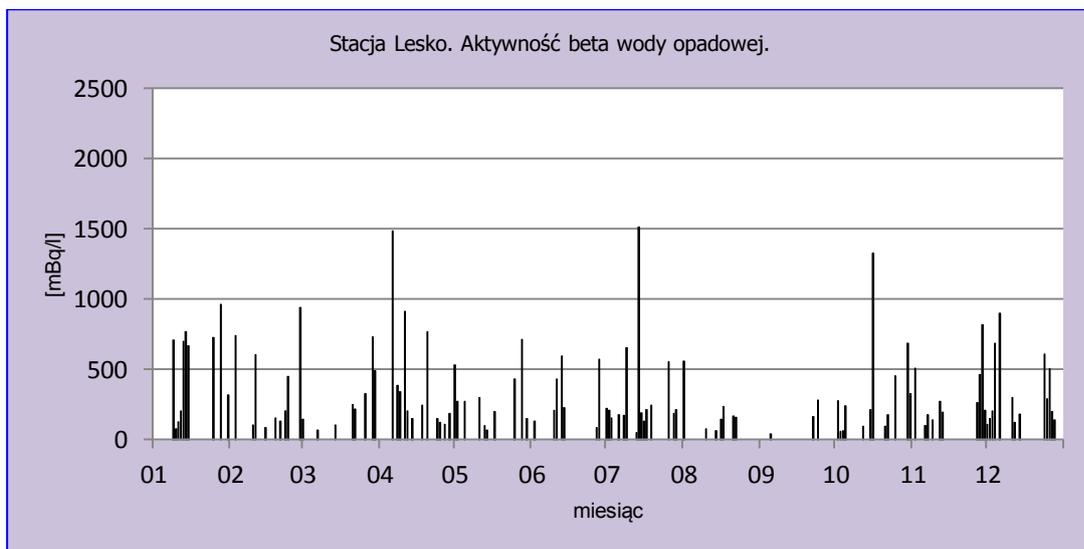
Rys.47. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Legnica w 2016 roku.



Rys.48. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Włodawa w 2016 roku.



Rys.49. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Zakopane w 2016 roku.



Rys.50. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Lesko w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnia aktywność beta wody opadowej w 2016 roku wyniosła 324 mBq l⁻¹ (Tabela 12). Maksymalna wartość, jaka wystąpiła w okresie od 2000 do 2016, przypada na rok 2003 i wynosi 376 mBq l⁻¹, minimalna wartość charakteryzuje próbki z 2014 – 311 mBq l⁻¹. Średnia aktywność beta wody opadowej w omawianym okresie wynosi 345 mBq l⁻¹.

Tabela 12. Średnie aktywności beta wody opadowej w latach 2000 – 2016, mBq l⁻¹.

Rok	Aktywność beta (mBq/l)
2000	352
2001	371
2002	348
2003	376
2004	374
2005	358
2006	346
2007	333
2008	338
2009	345
2010	328
2011	352
2012	342
2013	315
2014	311
2015	350
2016	324
Średnia	345
Minimalna	311
Maksymalna	376

3.3.3 Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego

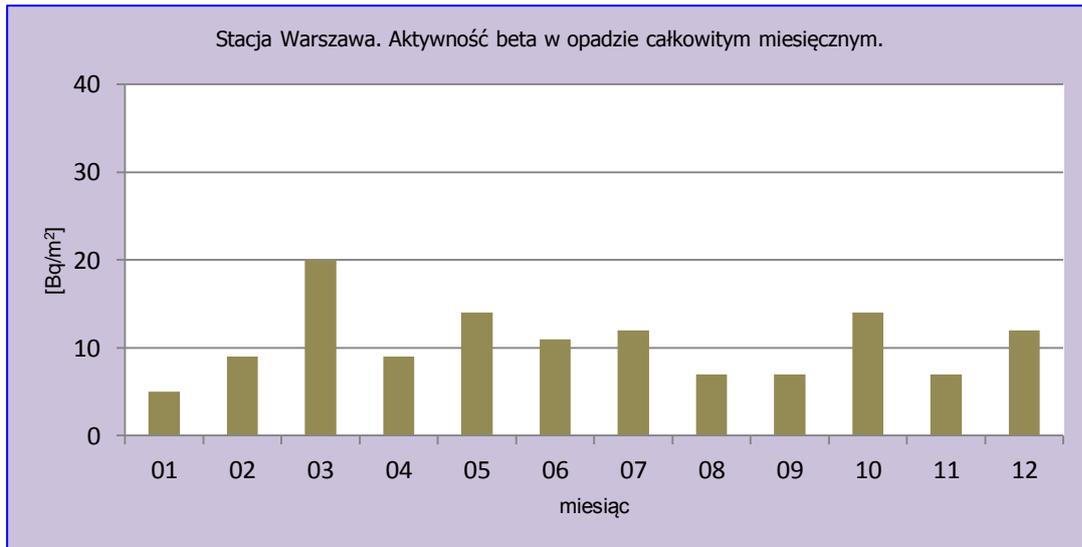
Całkowita aktywność promieniowania beta w opadzie miesięcznym związana jest, podobnie jak ma to miejsce w przypadku całkowitej aktywności opadu dobowego, z obecnością izotopów emitujących promieniowanie beta w próbkach opadu zbieranych w reżimie miesięcznym.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

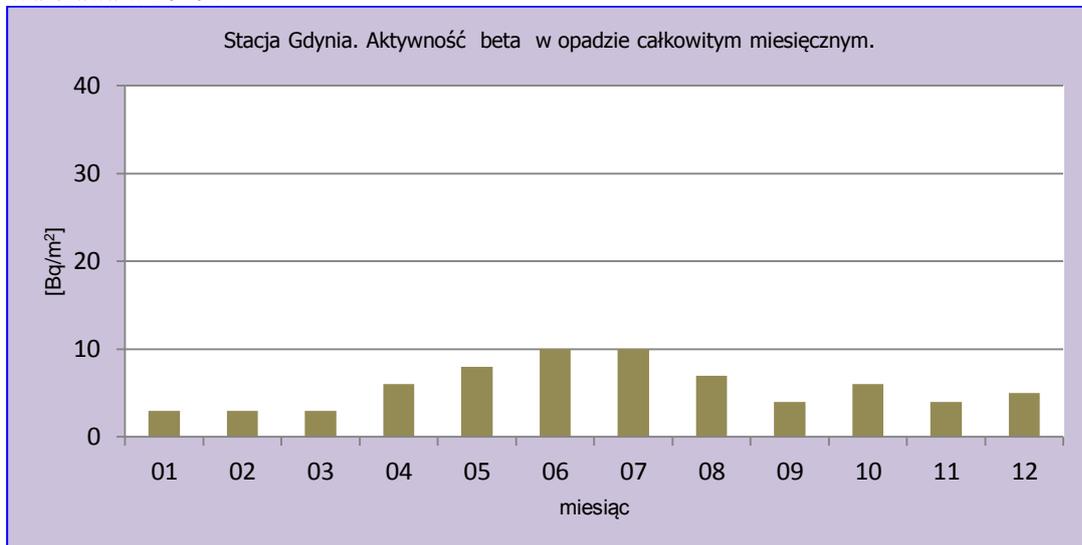
W 2016 roku aktywności promieniowania beta w miesięcznym opadzie atmosferycznym oscylowały w szerokim zakresie od 2 Bq m⁻² do 21 Bq m⁻² (Tabela 13). Maksymalną wartość w skali roku zarejestrowano w lipcu na stacji Zakopane (21 Bq m⁻²) oraz w marcu na stacji Warszawa (20 Bq m⁻²) a minimalne w miesiącach styczeń – marzec oraz listopad – grudzień na stacji w Świnoujściu (2 Bq m⁻²). Podobnie jak w roku poprzednim najniższe aktywności beta notowane były w okresie zimowym (styczeń, luty), a najwyższe w okresie letnim (maj – lipiec). Średnia roczna aktywność promieniowania beta w Polsce w próbkach opadu całkowitego wynosiła 7,8 Bq m⁻². Najniższe średnie roczne aktywności beta obliczone na podstawie danych dla zbiorczych próbek miesięcznego opadu całkowitego w 2016 roku zarejestrowano na stacjach zlokalizowanych na wybrzeżu: Świnoujście (4,4 Bq m⁻²) i Gdynia (5,8 Bq m⁻²) i były one odpowiednio o 44% i 25% niższe od średniej dla obszaru całej Polski (Rys. 51-59). Niskie wartości notowane w Gdyni i Świnoujściu podobnie jak w poprzednich rozdziałach spowodowane są bliskością morza i związanymi z tym warunkami meteorologicznymi np. cyrkulacją powietrza. Na pozostałych stacjach średnia aktywność promieniowania beta zmieniała się w zakresie od 6,9 Bq m⁻² w Legnicy do 10,6 Bq m⁻² na stacji Warszawa.

Tabela 13. Zestawienie wyników aktywności beta zbiorczych próbek miesięcznego opadu całkowitego w roku 2016, w Bq m⁻².

Miesiąc	Warszawa	Gdynia	Mikołajki	Poznań	Świnoujście	Legnica	Włodawa	Zakopane	Lesko
Styczeń	5	3	4	4	2	6	6	5	10
Luty	9	3	6	4	2	7	5	8	10
Marzec	20	3	6	4	2	5	9	5	7
Kwiecień	9	6	7	10	5	5	15	7	17
Maj	14	8	11	14	4	11	9	7	10
Czerwiec	11	10	10	11	8	8	9	7	11
Lipiec	12	10	12	11	7	8	13	21	13
Sierpień	7	7	8	6	7	8	6	14	10
Wrzesień	7	4	6	7	4	11	6	12	8
Październik	14	6	14	6	8	5	7	11	6
Listopad	7	4	6	6	2	4	6	9	6
Grudzień	12	5	7	6	2	5	7	6	7
Średnia	10,6	5,8	8,1	7,4	4,4	6,9	8,2	9,3	9,6
Maksymalna	20,0	10,0	14,0	14,0	8,0	11,0	15,0	21,0	17,0
Minimalna	5,0	3,0	4,0	4,0	2,0	4,0	5,0	5,0	6,0
Średnia roczna	7,8								
Maks. miesięczna	21,0								
Min. miesięczna	2,0								



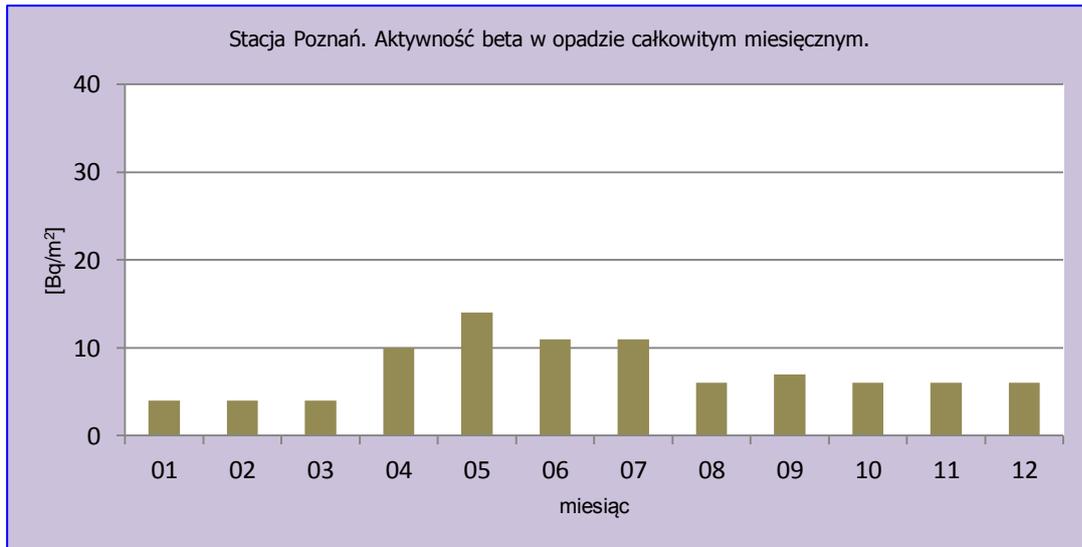
Rys.51. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Warszawa w 2016r.



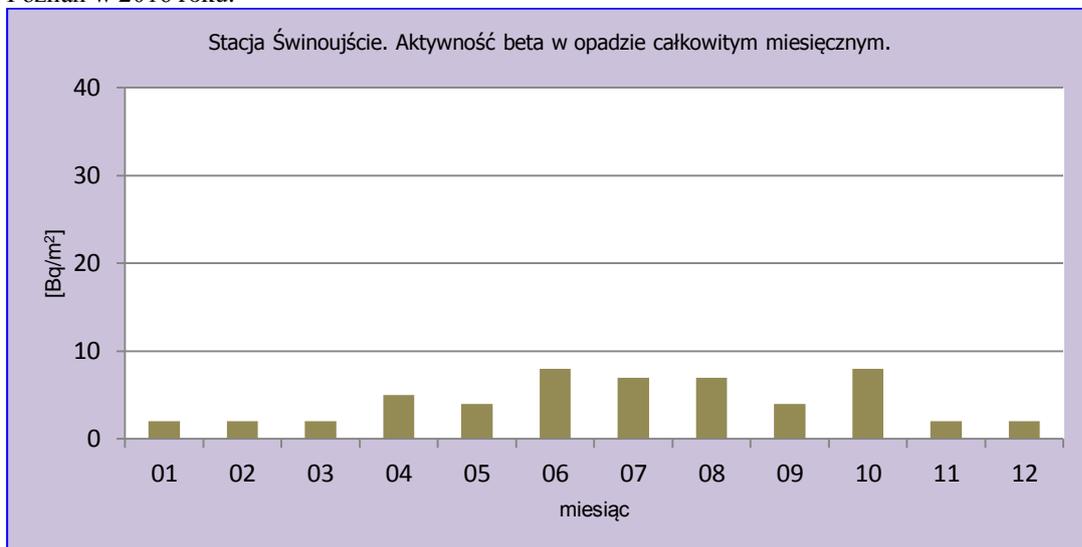
Rys.52. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Gdynia w 2016 roku.



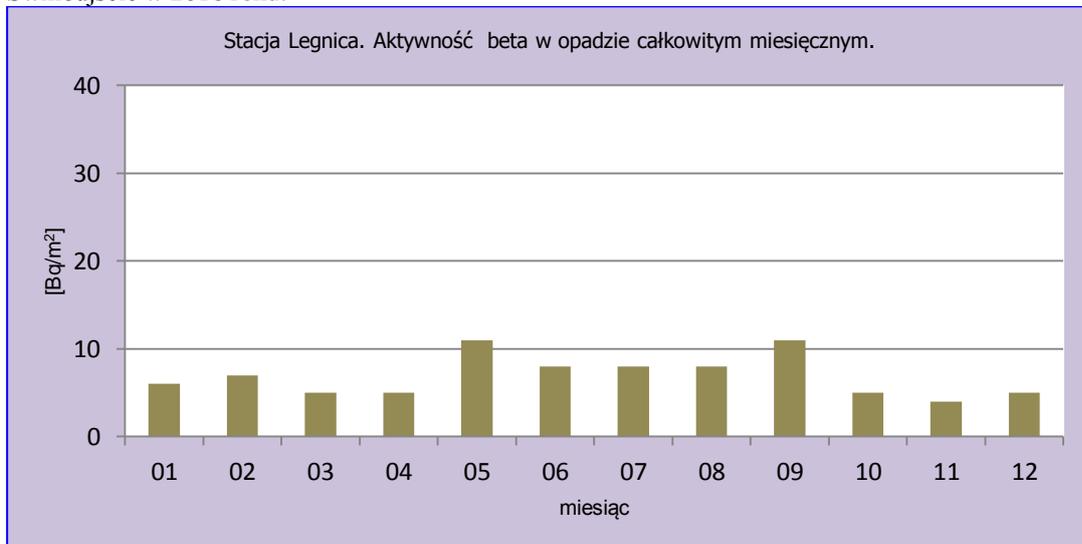
Rys.53. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Mikołajki w 2016 roku.



Rys.54. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Poznań w 2016 roku.



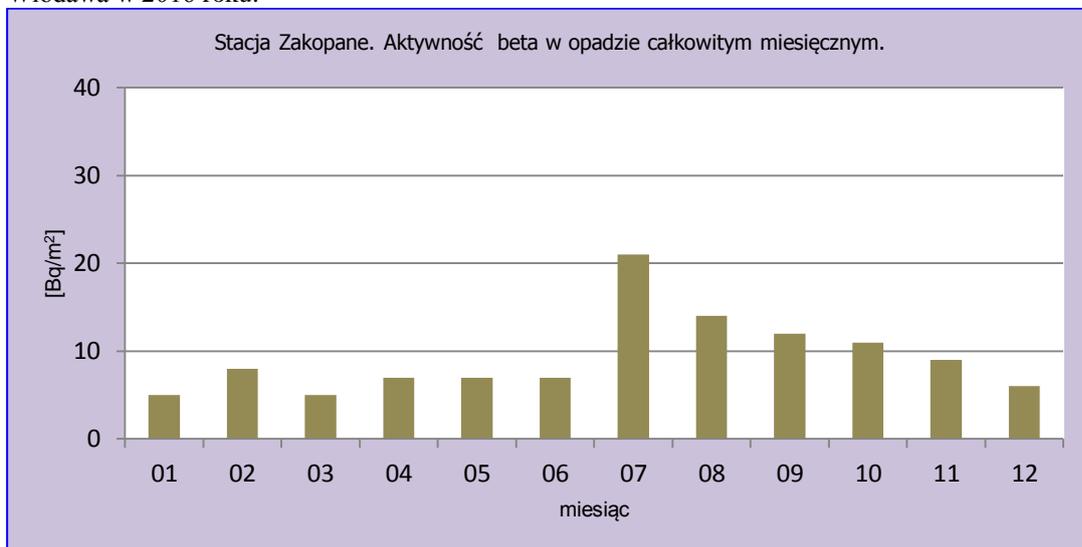
Rys.55. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Świnoujście w 2016 roku.



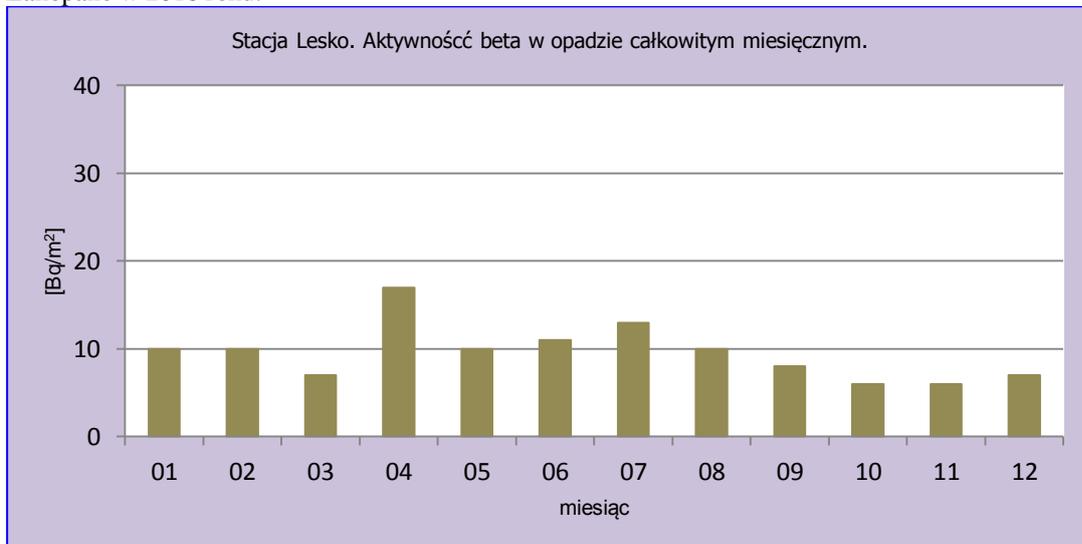
Rys.56. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Legnica w 2016 roku.



Rys.57. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Włodawa w 2016 roku.



Rys.58. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Zakopane w 2016 roku.



Rys.59. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Lesko w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W 2016 roku średnia aktywność promieniowania beta w całkowitym opadzie miesięcznym wynosiła $7,8 \text{ Bq m}^{-2}$ i była jedną z wyższych wartości odnotowanych w latach 2000-2016. W omawianym okresie średnia aktywność promieniowania beta wahała się w przedziale od 6 Bq m^{-2} (2005) do $8,2 \text{ Bq m}^{-2}$ (2010), a średnia aktywność całkowitego opadu atmosferycznego w badanym okresie wynosi $7,1 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 14).

Tabela 14. Średnie wartości aktywności beta całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000 – 2016, Bq m^{-2} .

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

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

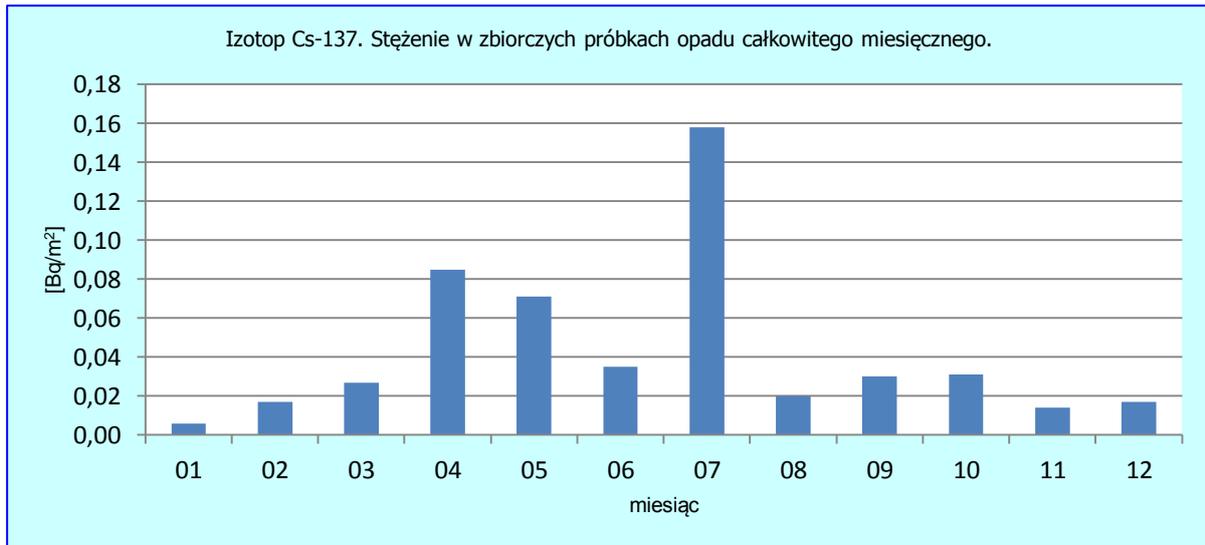
Promieniotwórcze izotopy cezu są izotopami pochodzenia antropogenicznego, o stosunkowo długim okresie połowicznego rozpadu (30,05 lat) w przypadku ^{137}Cs i zdecydowanie krótszym (2,07 lat) w przypadku ^{134}Cs . Ich stężenia promieniotwórcze (aktywność odniesiona do powierzchni) oznaczane są w zbiorczych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

Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

W 2016 roku średnie stężenie ^{137}Cs w opadzie atmosferycznym wynosiło $0,043 \text{ Bq m}^{-2}$, natomiast stężenia ^{134}Cs były poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej. Najniższe aktywności promieniotwórcze ^{137}Cs odnotowano w okresie zimowym: styczeń ($0,006 \text{ Bq m}^{-2}$), luty ($0,017 \text{ Bq m}^{-2}$), listopad ($0,014 \text{ Bq m}^{-2}$) i grudzień ($0,017 \text{ Bq m}^{-2}$), natomiast najwyższe wystąpiły w lipcu ($0,158 \text{ Bq m}^{-2}$) oraz w kwietniu ($0,085 \text{ Bq m}^{-2}$). Taki rozkład stężeń w roku był związany z intensywnymi opadami oraz łatwiejszym wypłukiwaniem izotopów z atmosfery. (Tabela 15, Rys. 60).

Tabela 15. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{134}Cs w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2016 r., Bq m^{-2} .

	Aktywność Bq m^{-2}	Aktywność Bq m^{-2}
Miesiąc	Cs-137	Cs-134
Styczeń	$0,006 \pm 0,002$	$< 0,003$
Luty	$0,017 \pm 0,002$	$< 0,003$
Marzec	$0,027 \pm 0,002$	$< 0,003$
Kwiecień	$0,085 \pm 0,003$	$< 0,003$
Maj	$0,071 \pm 0,003$	$< 0,004$
Czerwiec	$0,035 \pm 0,002$	$< 0,004$
Lipiec	$0,158 \pm 0,004$	$< 0,004$
Sierpień	$0,020 \pm 0,002$	$< 0,004$
Wrzesień	$0,030 \pm 0,002$	$< 0,004$
Październik	$0,031 \pm 0,002$	$< 0,003$
Listopad	$0,014 \pm 0,001$	$< 0,003$
Grudzień	$0,017 \pm 0,001$	$< 0,003$
Suma roczna	0,511	
Średnia	0,043	
Maksymalna	0,158	
Minimalna	0,006	

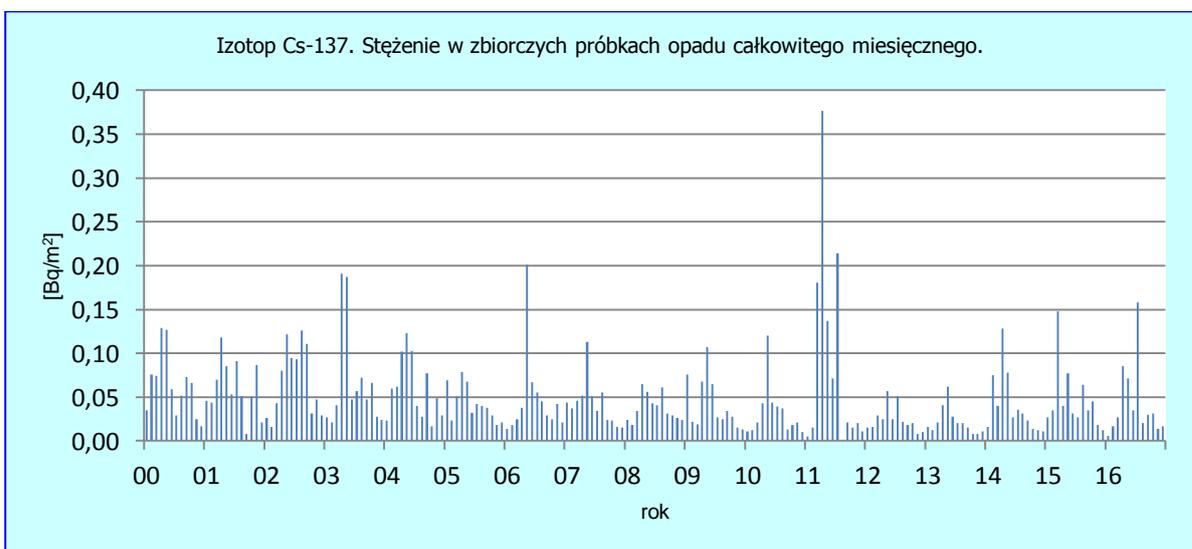


Rys.60. Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w roku 2016.

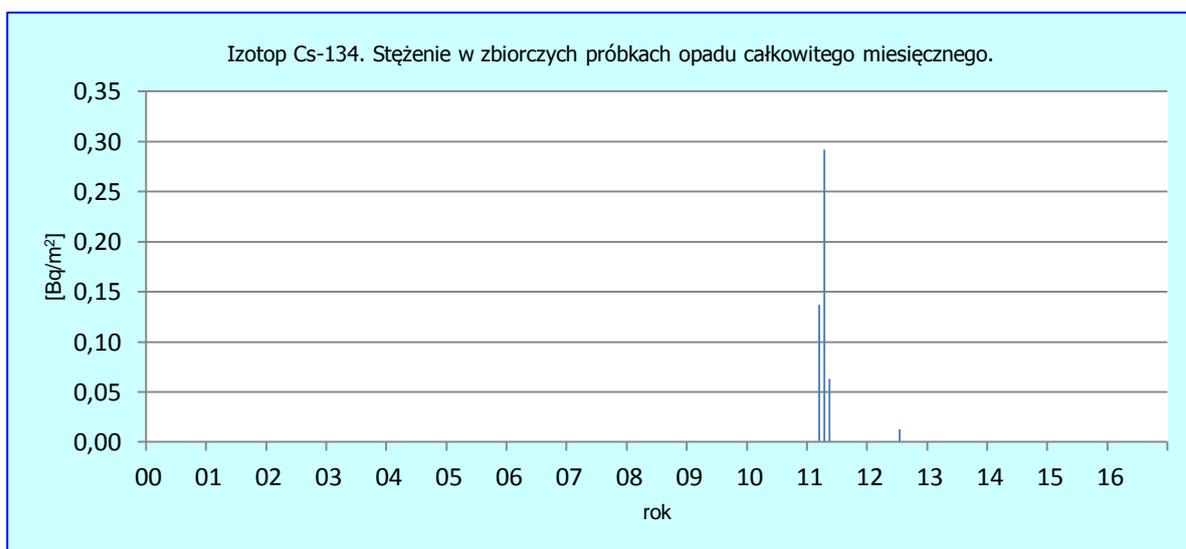
Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Izotop ¹³⁷Cs charakteryzuje się niską prędkością suchej depozycji (0,05 – 0,5 cm s⁻¹), dlatego ładunek tego izotopu docierający do powierzchni ziemi wzrasta w okresach intensywnych opadów, które powodują wypłukiwanie tego pierwiastka z atmosfery. W związku z tym największy dopływ ¹³⁷Cs do powierzchni ziemi występuje w okresie wiosenno-letnim, kiedy miesięczne sumy opadów są największe (Rys. 61). Roczna suma dopływu ¹³⁷Cs w 2016 roku wynosiła 0,511 Bq m⁻² i była o połowę mniejsza od wartości w 2011 roku (1,067 Bq m⁻²), kiedy odnotowano podwyższoną depozycję związaną z napływem skażonych mas powietrza znaną z Fukushima. Roczny dopływ ¹³⁷Cs wraz z całkowitym opadem atmosferycznym w roku 2016 był nieznacznie niższy niż w roku ubiegłym - 0,559 Bq m⁻² (Tabela 16, Rys. 63). Minimalny sumaryczny dopływ ¹³⁷Cs przypadła na rok 2013 (0,262 Bq m⁻²). W okresie 2000 – 2016 średnia suma rocznych dopływów ¹³⁷Cs osiągnęła wartość 0,585 Bq m⁻² (Tabela 16).

W przypadku izotopu ¹³⁴Cs, tylko w roku 2011 określono jego dopływ, w pozostałych latach jego stężenia nie przekraczały limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej (Rys.62). W omawianych pomiarach od roku 2000 oprócz incydentu w Fukushima nie zanotowano obecności ¹³⁴Cs w powietrzu.



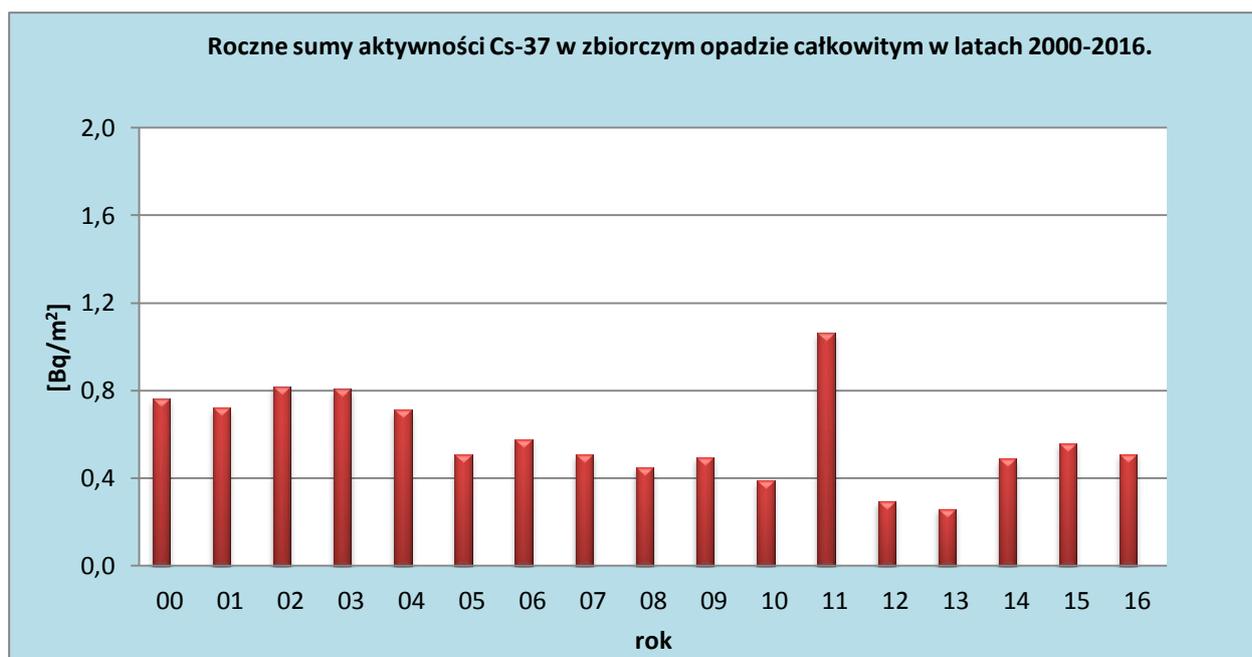
Rys.61. Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2016.



Rys.62. Stężenie promieniotwórcze ^{134}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2016.

Tabela 16. Roczna suma dopływu ^{137}Cs i ^{134}Cs w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2016, Bq m^{-2} .

Rok	^{137}Cs	^{134}Cs
2000	0,762	
2001	0,725	
2002	0,819	
2003	0,808	
2004	0,713	
2005	0,510	
2006	0,580	
2007	0,510	
2008	0,452	
2009	0,499	
2010	0,389	
2011	1,067	0,492
2012	0,296	
2013	0,262	
2014	0,491	
2015	0,559	
2016	0,511	
Średnia	0,585	
Minimalna	0,262	
Maksymalna	1,067	



Rys.63. Roczne sumy dopływu ¹³⁷Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2016.

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

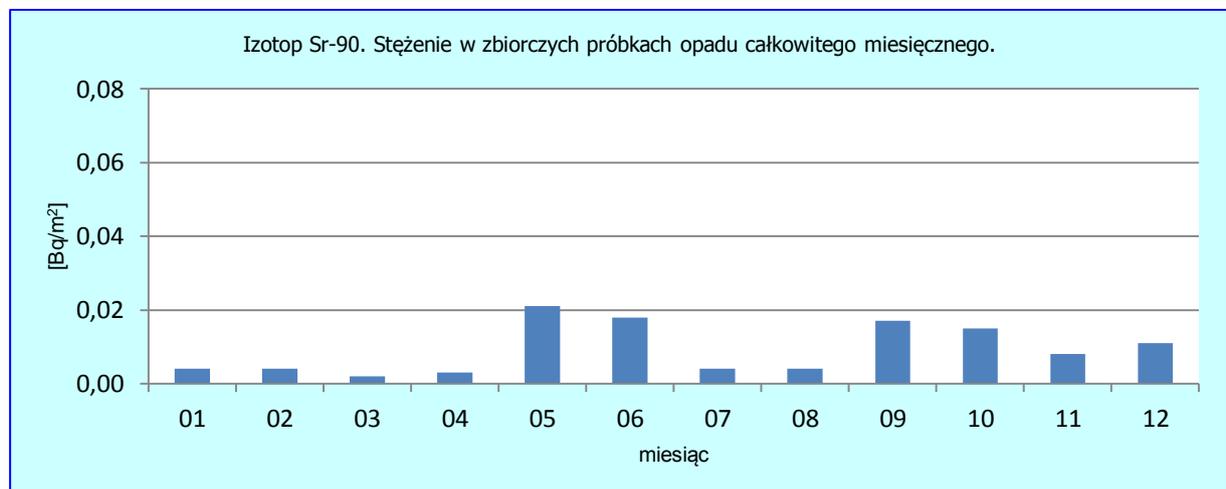
W tych samych zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego, w których analizowano izotopy cezu ^{137}Cs i ^{134}Cs przeprowadzono w 2016 roku pomiary stężeń promieniotwórczych antropogenicznego izotopu strontu – ^{90}Sr , który podobnie jak ^{137}Cs charakteryzuje się stosunkowo długim okresem połowicznego rozpadu (28 lat).

Analiza wyników uzyskanych w roku 2016

Najniższe stężenie ^{90}Sr zarejestrowano w marcu i kwietniu, aktywność badanego izotopu wynosiła odpowiednio $0,002 \text{ Bq m}^{-2}$ i $0,003 \text{ Bq m}^{-2}$. Najwyższe aktywności stwierdzono w maju ($0,021 \text{ Bq m}^{-2}$), czerwcu ($0,018 \text{ Bq m}^{-2}$) oraz we wrześniu ($0,017 \text{ Bq m}^{-2}$) (Tab. 17, Rys. 64). W przeciwieństwie do izotopu ^{137}Cs nie zaobserwowano wyższych aktywności izotopu ^{90}Sr w miesiącach z wyższą sumą opadów, czego przyczyną może być czterokrotnie wyższa prędkość suchej depozycji ^{90}Sr .

Tabela 17. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2016 r.

	Aktywność Bq m^{-2}
Miesiąc	Sr-90
Styczeń	$0,004 \pm 0,001$
Luty	$0,004 \pm 0,001$
Marzec	$0,002 \pm 0,001$
Kwiecień	$0,003 \pm 0,001$
Maj	$0,021 \pm 0,001$
Czerwiec	$0,018 \pm 0,001$
Lipiec	$0,004 \pm 0,001$
Sierpień	$0,004 \pm 0,001$
Wrzesień	$0,017 \pm 0,001$
Październik	$0,015 \pm 0,001$
Listopad	$0,008 \pm 0,001$
Grudzień	$0,011 \pm 0,001$
Suma roczna	0,111
Średnia	0,009
Maksymalna	0,021
Minimalna	0,002



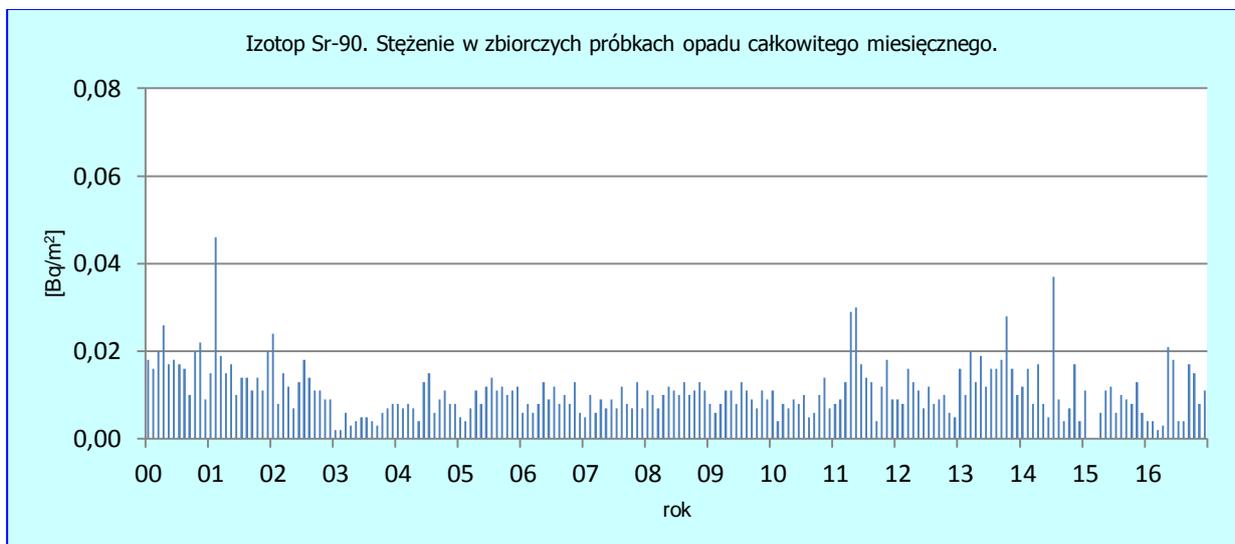
Rys.64. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2016 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

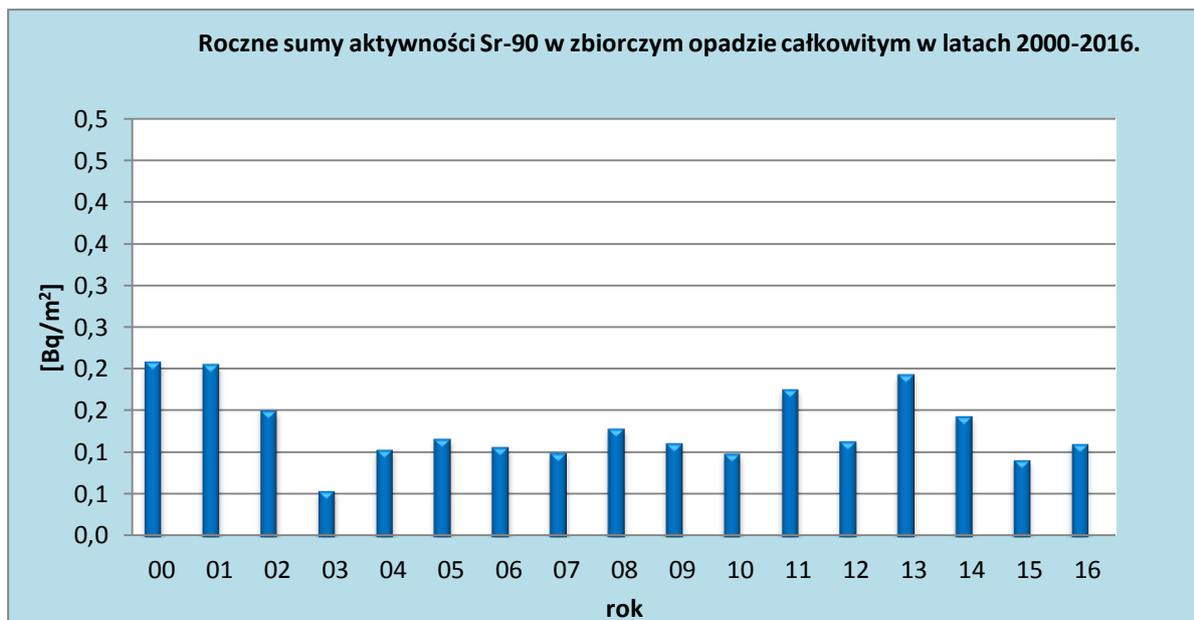
Najwyższe roczne sumy aktywności ^{90}Sr zmierzono w opadzie całkowitym w latach 2000, 2001 oraz 2013 (Tab. 18). Wynosiły one odpowiednio: $0,209 \text{ Bq m}^{-2}$, $0,206 \text{ Bq m}^{-2}$ i $0,195 \text{ Bq m}^{-2}$, a najniższą wartość odnotowano w roku 2003 ($0,055 \text{ Bq m}^{-2}$). Roczny dopływ ^{90}Sr wraz z opadem całkowitym w 2016 roku wynosił $0,111 \text{ Bq m}^{-2}$ i był o 20% wyższy niż całkowity ładunek w roku poprzednim i zarazem o 18% niższy niż średnia roczna suma tego izotopu w latach 2000-2016.

Tabela 18. Roczna suma aktywności ^{90}Sr w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2016, Bq m^{-2} .

Rok	^{90}Sr
2000	0,209
2001	0,206
2002	0,151
2003	0,055
2004	0,104
2005	0,117
2006	0,107
2007	0,100
2008	0,129
2009	0,112
2010	0,099
2011	0,176
2012	0,114
2013	0,195
2014	0,144
2015	0,092
2016	0,111
Średnia	0,131
Minimalna	0,055
Maksymalna	0,209



Rys.65. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2016.



Rys.66. Roczne sumy dopływu ⁹⁰Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2016.

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

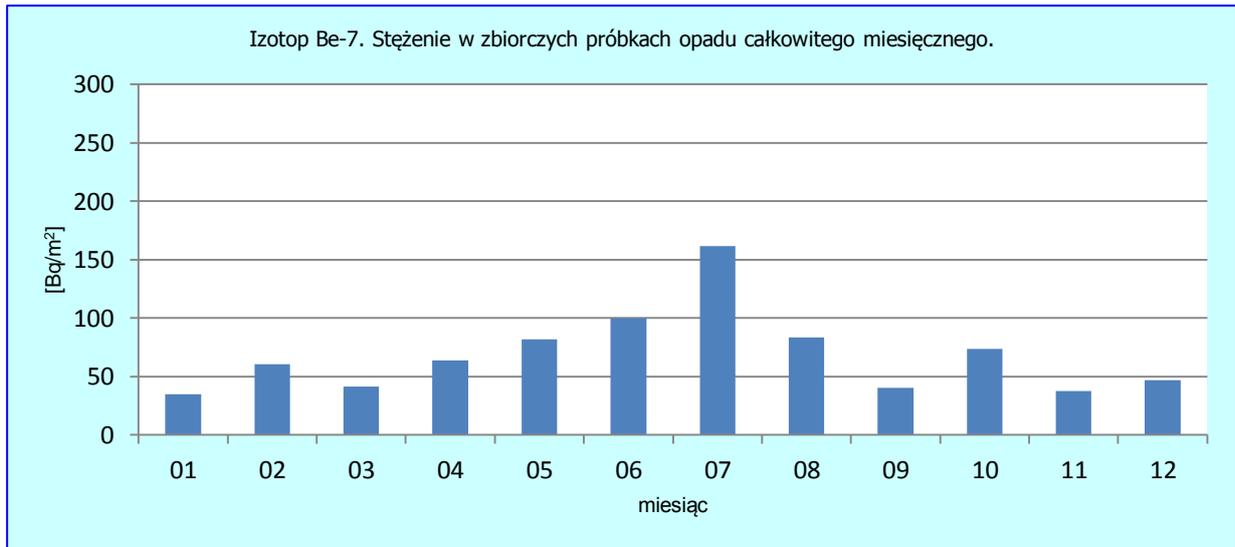
W 2016 roku, w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego oznaczano również stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego: ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac i ^{40}K . Izotop ^{40}K jest najbardziej rozpowszechnionym izotopem z bardzo długim okresem połowicznego rozpadu wynoszącym $1,251 \cdot 10^9$ lat. ^{226}Ra jest produktem rozpadu w szeregu uranowym – radowym (^{238}U), jego okres połowicznego rozpadu wynosi 1599 lat. ^{228}Ac jest produktem rozpadu w szeregu torowym (^{232}Th) 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 2016

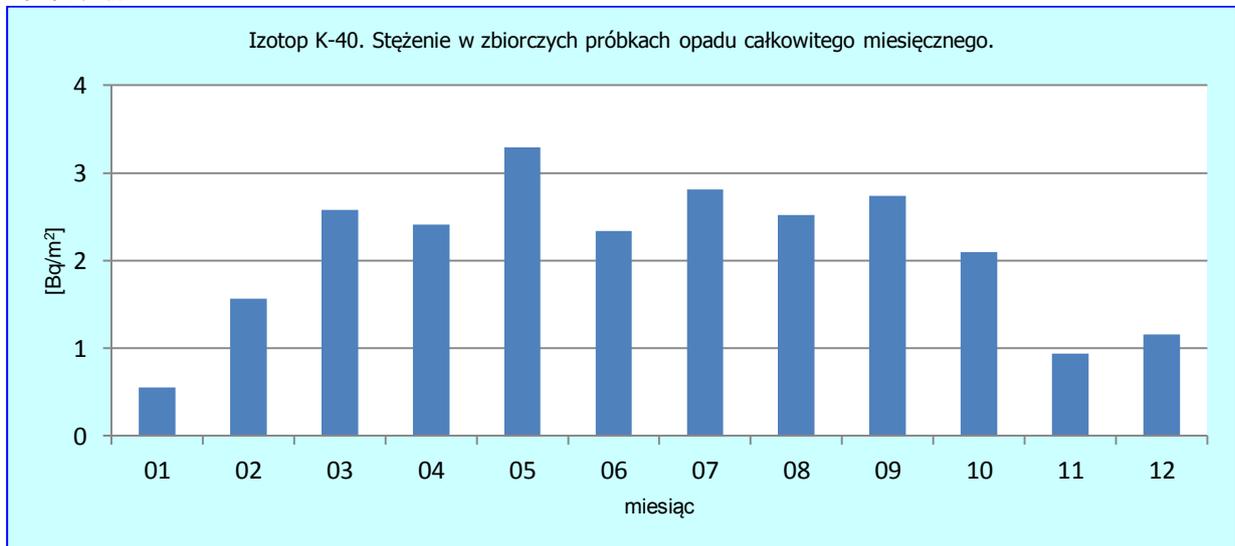
Podobnie jak w latach ubiegłych najwyższą aktywnością charakteryzował się ^7Be . Średnia roczna aktywność tego izotopu wynosiła $68,9 \text{ Bq m}^{-2}$ i wahała się w zakresie od $34,8 \text{ Bq m}^{-2}$ (styczeń) do $161,6 \text{ Bq m}^{-2}$ (lipiec) (Tabela 16, Rys. 67). Roczny dopływ tego izotopu wynosił $826,5 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 19). Aktywność ^{40}K zmieniała się w zakresie od $0,55 \text{ Bq m}^{-2}$ (styczeń) do $3,29 \text{ Bq m}^{-2}$ (maj), natomiast roczny dopływ był na poziomie $25,0 \text{ Bq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ (Tabela 16, Rys. 68). W przypadku ^{226}Ra roczny dopływ wynosił $1,45 \text{ Bq m}^{-2}$ a miesięczne ładunki oscylowały w zakresie od $0,062 \text{ Bq m}^{-2}$ (październik) do $0,195 \text{ Bq m}^{-2}$ (sierpień) (Tabela 16, Rys. 69). Roczny dopływ ^{228}Ac był dwa razy niż ^{226}Ra i wynosił $0,716 \text{ Bq m}^{-2}$, a jego miesięczne ładunki mieściły się w przedziale od $0,028 \text{ Bq m}^{-2}$ w styczniu do $0,083 \text{ Bq m}^{-2}$ w czerwcu (Tabela 16, Rys. 70).

Tabela 19. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac i ^{40}K w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2016 r., Bq m^{-2} .

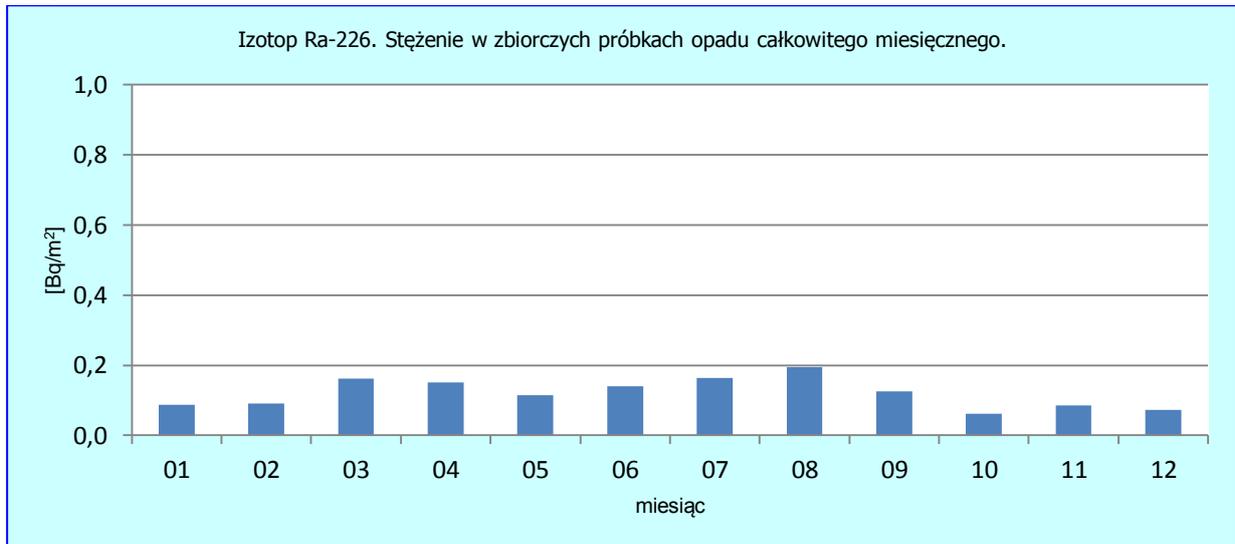
Miesiąc	Aktywność Bq m^{-2}			
	^{228}Ac	^7Be	^{40}K	^{226}Ra
Styczeń	0,028	34,809	0,553	0,088
Luty	0,063	60,729	1,566	0,091
Marzec	0,066	41,617	2,580	0,162
Kwiecień	0,077	63,835	2,413	0,151
Maj	0,060	81,776	3,290	0,114
Czerwiec	0,083	99,811	2,341	0,140
Lipiec	0,071	161,577	2,809	0,164
Sierpień	0,073	83,641	2,522	0,195
Wrzesień	0,071	40,140	2,740	0,125
Październik	0,054	73,769	2,095	0,062
Listopad	0,042	37,722	0,937	0,085
Grudzień	0,028	47,036	1,160	0,073
Suma roczna	0,716	826,462	25,006	1,450
Średnia	0,060	68,872	2,084	0,121
Maksymalna	0,083	161,577	3,290	0,195
Minimalna	0,028	34,809	0,553	0,062



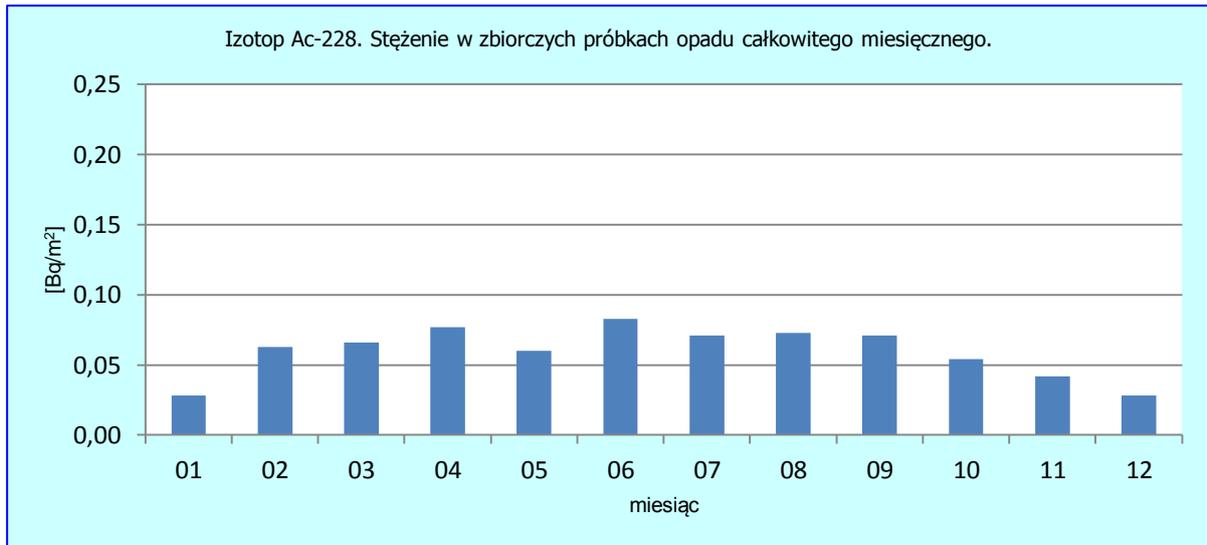
Rys.67. Stężenie promieniotwórcze ⁷Be w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2016 roku.



Rys.68. Stężenie promieniotwórcze ⁴⁰K w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2016 roku.



Rys.69. Stężenie promieniotwórcze ²²⁶Ra w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2016 roku.



Rys. 70. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2016 roku.

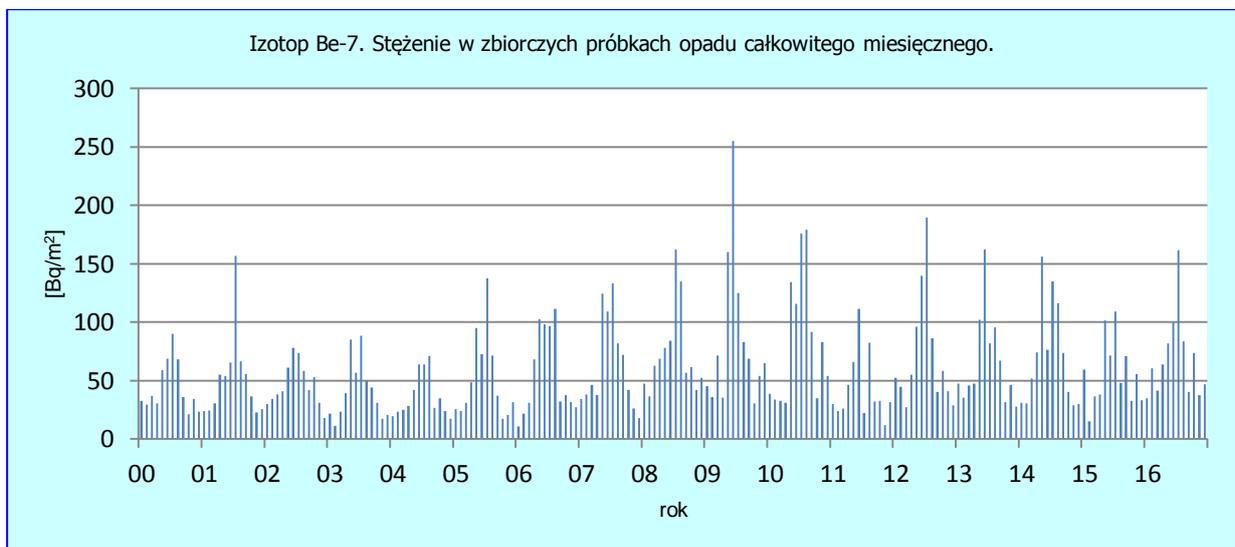
Porównanie wyników uzyskanych w roku 2016 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W okresie od 2000 do 2016 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.

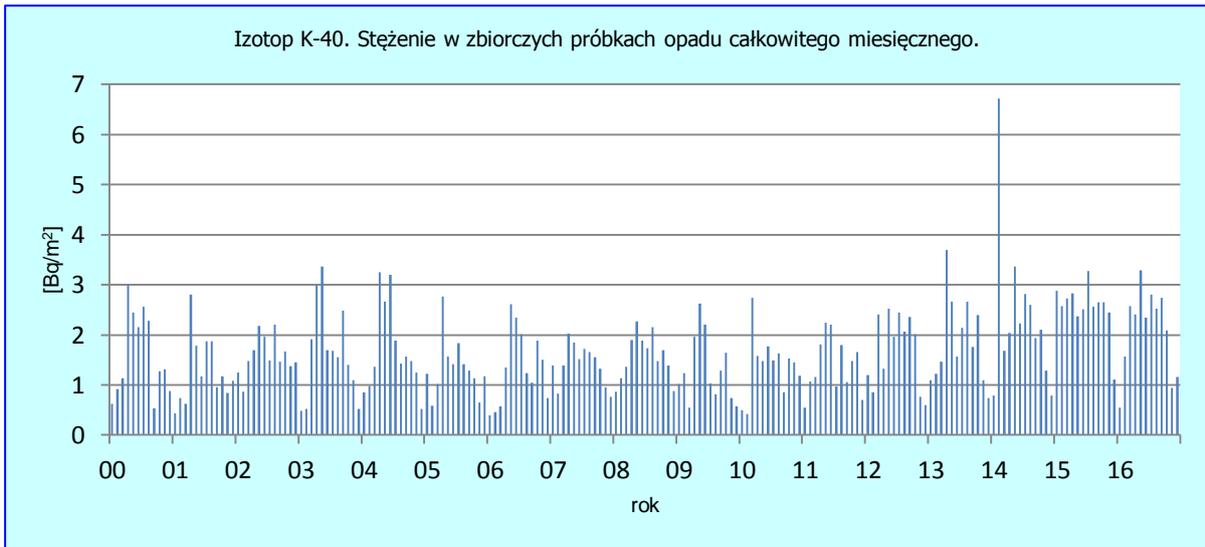
W roku 2016 średnie roczne ładunki pierwiastków: ^7Be , ^{40}K i ^{228}Ac były wyższe od średniej z wielolecia (2000-2016), a w przypadku ^{226}Ra ładunek z roku 2016 był niższy od średniej z badanego okresu (Tabela 20).

Tabela 20. Roczna suma aktywności ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac , ^{40}K w zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2016, Bq m^{-2}

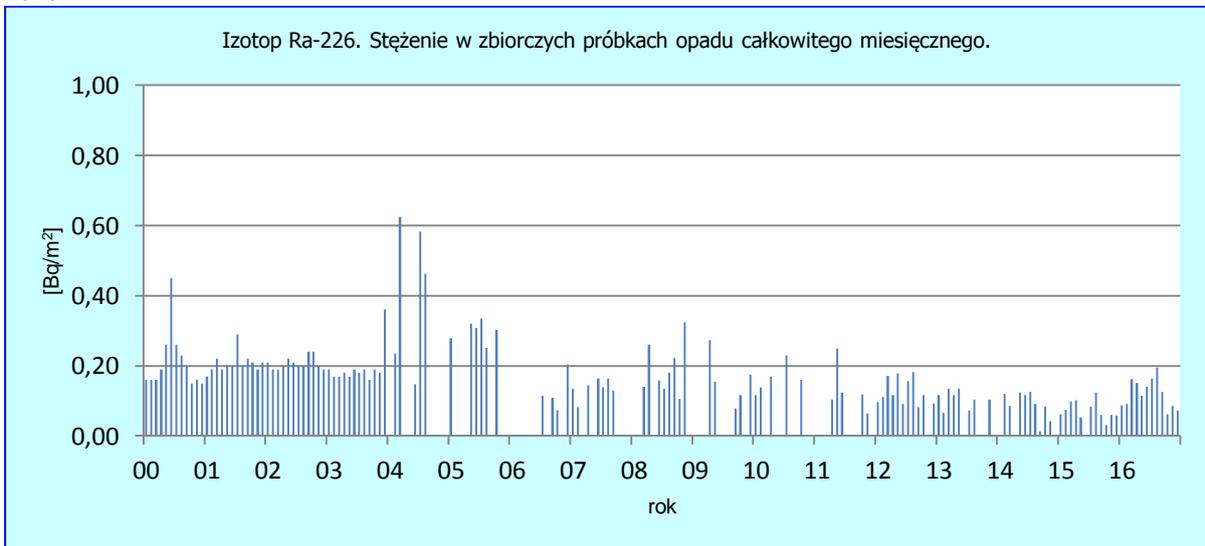
Rok	^7Be	^{40}K	^{226}Ra	^{228}Ac
2000	532,0	19,14	2,530	
2001	618,0	15,34	2,490	
2002	559,7	19,06	2,490	
2003	489,5	19,72	2,330	
2004	439,6	20,45	2,974	
2005	614,1	16,06	2,584	0,402
2006	670,9	16,18	1,068	0,450
2007	764,6	16,99	1,299	0,493
2008	888,3	18,76	1,817	0,614
2009	1029,9	15,69	1,414	0,676
2010	1005,7	16,63	0,814	0,366
2011	517,8	16,69	0,659	0,194
2012	859,9	20,50	1,393	0,528
2013	790,8	22,52	0,848	0,069
2014	845,4	28,38	0,801	0,531
2015	673,6	30,57	0,804	0,643
2016	826,462	25,006	1,450	0,716
Średnia	713,314	19,864	1,633	0,474
Minimalna	439,582	15,340	0,659	0,069
Maksymalna	1029,896	30,566	2,974	0,716



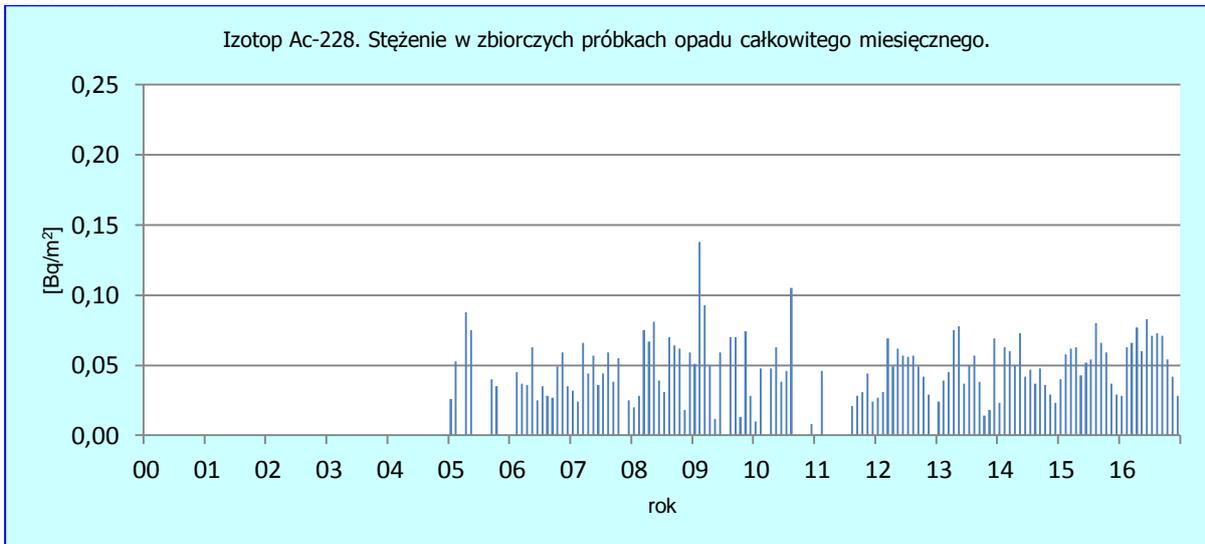
Rys.71. Stężenie promieniotwórcze ^7Be w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2016.



Rys. 72. Stężenie promieniotwórcze ^{40}K w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2016.



Rys. 73. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2016.



Rys.74. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2016.

4. Podsumowanie

W 2016 roku monitoring radioaktywności przyziemnej warstwy atmosfery prowadzono w ramach Umowy nr 13/F/2013 oraz 36/2015/F 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. Stacje IMGW-PIB zlokalizowane są w Warszawie, Gdyni, Włodawie, Świnoujściu, Gorzowie Wlkp., Poznaniu³, Lesku, Zakopanem, Legnicy i Mikołajkach.

W 2016 roku prowadzono pomiary 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 2016 zestawiono w Tabeli 21 na kolejnej stronie.

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

Tabela 21. Zestawienie wyników uzyskanych w roku 2016.

Lp.	Rodzaj pomiaru	Wartość średnia/Suma roczna ⁴			
1.	Moc dawki promieniowania gamma. Wartości na poziomie tła	Wartość średnia 92,1 nSv/h Str.16			
2.	Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach powietrza Wartości na poziomie tła	Wartość średnia 7,7 Bq/m³ Str. 22			
3.	Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach Wartości na poziomie tła	Wartość średnia 0,065 Bq/m³ Str. 26			
4.	Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach powietrza Wartości na poziomie tła	Wartość średnia 0,240 Bq/m³ Str. 30			
5.	Globalna aktywność beta całkowitego opadu dobowego oraz roczna suma aktywności beta całkowitego opadu dobowego. Wartości na poziomie tła	Wartość średnia 0,9 Bq/m² Str. 33	Suma roczna 312 kBq/m² Str. 33		
6.	Globalna aktywność beta wody opadowej Wartości na poziomie tła	Wartość średnia 324 mBq/litr Str. 38			
7.	Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego Wartości na poziomie tła	Wartość średnia 7,8 Bq/m² Str. 43			
8.	Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą	Wartość średnia 0,043 Bq/m² Str. 48	Suma roczna 0,511 Bq/m² Str. 48		
9.	Stężenie promieniotwórcze ¹³⁴ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego Bardzo niskie wartości na poziomie zdolności detekcyjnych aparatury	<i>Ponizej zdolności detekcji</i>		<i>Ponizej zdolności detekcji</i>	
10.	Stężenie promieniotwórcze ⁹⁰ Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą	Wartość średnia Bq/m² 0,009 Str. 52	Suma roczna Bq/m² 0,111 Str. 52		
12.	Sumy roczne aktywności ⁷ Be, ⁴⁰ K, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ac w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. Wartości na poziomie tła Str. 58	Be-7	K-40	Ra-226	Ac-228
		827 Bq/m²	25 Bq/m²	1,45 Bq/m²	0,716 Bq/m²

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 2016 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 2016 roku wynosiła $92,1 \text{ nSv h}^{-1}$ i była wyższa od obserwowanej w roku poprzednim o $0,6 \text{ nSv h}^{-1}$. W latach 2000 - 2016 nie obserwowano wyraźnych trendów ani istotnych zmian średniej mocy dawki promieniowania gamma charakterystycznej dla obszaru Polski. W omawianym okresie wartości te zmieniały się w stosunkowo wąskim przedziale od $89,6 \text{ nSv h}^{-1}$ w 2010 roku do $99,1 \text{ nSv h}^{-1}$ w 2000 roku. Średnia wartość mocy dawki promieniowania gamma uzyskana ze średnich rocznych w badanych latach wynosiła $94,4 \text{ nSv h}^{-1}$.

W roku 2016 średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolu zawieszonych w powietrzu było o $0,5 \text{ Bq m}^{-3}$ wyższe niż w ubiegłym roku i wynosiło $7,7 \text{ Bq m}^{-3}$. Zbliżone wartości otrzymano również w latach 2003 -2007 oraz w roku 2011. W okresie ostatnich 16 lat nie obserwuje się jednoznacznych trendów zmian. Najniższe średnie stężenie ($4,9 \text{ Bq m}^{-3}$) charakteryzowało rok 2001, najwyższe natomiast ($8,6 \text{ Bq m}^{-3}$) wystąpiło w 2008 roku. Średnia obliczona na podstawie danych z okresu 2000 – 2016 r. wynosi $7,0 \text{ Bq m}^{-3}$.

W przypadku izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa, średnie roczne stężenie promieniotwórcze w 2016 roku wyniosło $0,065 \text{ Bq m}^{-3}$ i było prawie 13% niższe niż w roku poprzednim. W latach 2000 – 2016 średnie roczne stężenie wynosiło $0,031 \text{ Bq m}^{-3}$ i mieściło się w przedziale od $0,004 \text{ Bq m}^{-3}$ (2001) do $0,074 \text{ Bq m}^{-3}$ (2015)

W 2016 roku średnie roczne stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta wyniosło $0,240 \text{ Bq m}^{-3}$ i było porównywalne z wartością z roku poprzedniego - $0,241 \text{ Bq m}^{-3}$. Średnie roczne stężenia uzyskane w latach 2015 i 2016 były jednymi z najwyższych odnotowanych w okresie 2000–2016 r., ale są to nadal wartości zbliżone do tła naturalnego i niestanowiące zagrożenia.

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

Globalna aktywność beta w całkowitym opadzie dobowym dla całego obszaru Polski, opisująca dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta do powierzchni ziemi, obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wyznaczonych stacjach w 2016 roku ($0,31 \text{ kBq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$) była taka sama jak w latach 2006, 2007, 2013 i 2015. Wartość średnia obliczona dla okresu 2000-2016 utrzymuje się na poziomie $0,32 \text{ kBq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$.

Średnia aktywność beta wody opadowej w 2016 roku wyniosła 324 mBq l^{-1} . Maksymalna wartość jaka wystąpiła w latach 2000-2016, przypada na rok 2003 i wynosi 376 mBq l^{-1} , minimalna wartość charakteryzuje próbki z roku 2014 tj. 311 mBq l^{-1} . Średnia aktywność beta wody opadowej w omawianym okresie wynosi 345 mBq l^{-1} .

Średnia aktywność promieniowania beta w całkowitym miesięcznym opadzie w 2016 r. wynosiła $7,8 \text{ Bq m}^{-2}$ i była jedną z wyższych wartości odnotowanych w latach 2000-2016. W omawianym okresie średnia aktywność promieniowania beta wahała się w przedziale od 6 Bq m^{-2} (2005 r.) do $8,2 \text{ Bq m}^{-2}$ (2010r.), a średnia aktywność całkowitego opadu atmosferycznego w badanym okresie wynosi $7,1 \text{ Bq m}^{-2}$.

Średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w opadzie atmosferycznym wynosiło $0,043 \text{ Bq m}^{-2}$. Najniższy dopływ ^{137}Cs odnotowano w okresie zimowym styczeń ($0,006 \text{ Bq m}^{-2}$), luty ($0,017 \text{ Bq m}^{-2}$), listopad ($0,014 \text{ Bq m}^{-2}$) i grudzień ($0,017 \text{ Bq m}^{-2}$), natomiast najwyższe dopływy wystąpiły w lipcu ($0,158 \text{ Bq m}^{-2}$) oraz w kwietniu ($0,085 \text{ Bq m}^{-2}$). W okresie od 2000 do 2016 roku ładunek izotopu ^{134}Cs rejestrowany był jedynie w okresie marzec-maj 2011 r., kiedy nad Polskę dotarły skażone masy powietrza po awarii elektrowni atomowej Fukushima Daiichi, podczas gdy w pozostałym okresie pomiarowym jego aktywność pozostawała poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej.

Roczny dopływ ^{137}Cs wraz z całkowitym opadem atmosferycznym w roku 2016 wyniósł $0,511 \text{ Bq m}^{-2}$ i był niższy niż roku 2015 tzn. $0,559 \text{ Bq m}^{-2}$. Minimalny sumaryczny dopływ ^{137}Cs przypadał na rok 2013 ($0,262 \text{ Bq m}^{-2}$), maksymalny zaś uzyskano w 2011 i był na poziomie $1,067 \text{ Bq m}^{-2}$. W latach 2000 – 2016 średnia suma rocznych dopływów ^{137}Cs wynosiła $0,585 \text{ Bq m}^{-2}$

Roczny dopływ ^{90}Sr wraz z opadem całkowitym w 2016 roku wynosił $0,111 \text{ Bq m}^{-2}$ i był o 20% wyższy niż w roku poprzednim. Minimalny dopływ przypadął na rok 2003 i wynosił $0,055 \text{ Bq m}^{-2}$, a najwyższy był w opadzie całkowitym w roku 2000 i wynosił $0,209 \text{ Bq m}^{-2}$.

W okresie od 2000 do 2016 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 na skutek zwiększonych opadów. W roku 2016 średnie roczne ładunki pierwiastków: ^7Be , ^{40}K i ^{228}Ac były wyższe od średniej z wielolecia (tj. w latach 2000-2016), a w przypadku ^{226}Ra ładunek z roku 2016 był niższy od średniej z badanego okresu.