

INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY



**„Monitoring promieniowania jonizującego realizowany
w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska
w latach 2018 – 2020.**

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

**ETAP III
RAPORT PRZEDSTAWIAJĄCY WYNIKI i ANALIZY
ZA ROK 2019**



Dofinansowanie ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej

Praca wykonana na podstawie Umowy IMGW-PIB z GIOŚ nr 8/2018/F z dnia 30.05.18r. finansowanej na podstawie umowy nr 50/2019/Wn50/MN-po/D z 18.02.2019r. o realizację zadania państwowej jednostki budżetowej zakwalifikowanego do dofinansowania, zawartej między Narodowym Funduszem Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej a Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska.

Mgr Andrzej Czuryłowski
Mgr Paweł Miszczuk
Mgr inż. Anna Apanel
Dr Michał Saniewski
Dr hab. inż. Tamara Zalewska prof. IMGW-PIB

Sprawdził i zatwierdził

K I E R O W N I K
Zakładu Monitorowania Jakości Powietrza

mgr Julita Biszczuk-Jakubowska

WARSZAWA 2020

Spis treści

1. Cel i zakres pracy
2. Metodyka badań prowadzonych na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych
 - 2.1. Pobór i przygotowanie próbek
 - 2.2. Metody pomiarowe wraz z opisem systemu zapewnienia jakości pomiarów
3. Wyniki i omówienie wyników z 2019 roku oraz w odniesieniu do okresu 2000-2018
 - 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

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 maja 2018 roku podpisana została umowa nr 8/2018/F między IMGW-PIB a Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska na wykonanie pracy pt.: „**Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska w latach 2018 – 2020. Zadanie 1: Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych**”.

W ramach umowy IMGW-PIB zobowiązany jest do wykonywania pomiarów w okresie od 1 października 2018 roku do 30 września 2020 roku, jak również do przedstawiania uzyskanych wyników w postaci zestawień oraz raportów rocznych.

Niniejszy raport prezentuje wyniki pomiarów prowadzonych od 1 stycznia 2019 do 31 grudnia 2019 r., które zostały wykonane w ramach umowy 8/2018/F z dnia 30.05.2018 r. „**Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska w latach 2018 – 2020. 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 2019 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 opadu całkowitego), 006 – Gorzów Wlkp. 007 – Świnoujście, 008 – Legnica, 151 – Włodawa, 165 – Zakopane, 166 – Lesko obejmuje:

- a) Pobór próbek całkowitego opadu dobowego polegający na zbieraniu opadu (mokrego i suchego) do kuwety o powierzchni 1500 cm^2 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 o wymiarach: 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 cm^2 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 o wymiarach: 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) Dodatkowo można przeprowadzić pobór próbek aerozoli powietrza w pompie jodowej odbywający się poprzez wymuszony przepływ powietrza przez filtry bibułowe oraz węglowe w cyklach półgodzicznych. Próbki w takiej postaci poddane są pomiarom spektrometrycznym.

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, dokonuje równoczesnego i niezależnego pomiaru:

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

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

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

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

o przemysłową kartę NAND Flash SLC microSD.

W sondzie TDSG zastosowano następujące detektory wartości fizycznych:

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

Rejestracja danych pomiarowych

Rejestracja danych odbywa się poprzez specjalistyczne oprogramowanie komputera w języku polskim, sterujące i współpracujące z sondą TDSG, o następujących funkcjach:

1. Zadawanie parametrów pracy (HV, wzmocnienia zgrubnego i precyzyjnego, parametrów układu stabilizacji widma, czasu pojedynczego pomiaru, współczynników kalibracyjnych),
2. Zapis i odczyt danych pomiarowych (bieżących i archiwalnych) – mocy dawki, spektrum, czasu pomiaru, ilości impulsów, temperatury, wilgotności,
3. Prezentacja na monitorze komputera danych pomiarowych (bieżących i archiwalnych) w postaci cyfrowej i wykresów,
4. Analiza danych pomiarowych w oparciu o zadane algorytmy w celu wykrycia obecności w powietrzu i rozróżnienia sztucznych i naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych, odpowiedzialnych za wzrost mocy dawki,
5. Algorytm rozpoznawania izotopów w sposób ręczny lub automatyczny,
6. Zapis wszystkich danych pomiarowych bieżących i archiwalnych do plików tekstowych i XML,
7. Współpraca oprogramowania z sondą TDSG z komputera lokalnego (przez port szeregowy, jak i LAN) oraz z komputerów zdalnych (przez intranet),
8. Przeprowadzanie wstępnej autokalibracji,
9. Autodiagnostyka prawidłowości pracy i zbieranych wyników pomiarowych,
10. Tworzenie raportów zawierających wyniki pomiarów oraz wykresy (w formacie txt oraz PDF) za dowolny okres,
11. Funkcja statystyki danych pomiarowych tj. określanie wyników każdego pomiaru w postaci średnich godzinnych oraz średnich, maksymalnych i minimalnych za dobę oraz inny dowolny okres, obliczanie odchylenia standardowego dla dowolnej serii danych pomiarowych i zapis obliczeń w plikach txt oraz możliwość dołączenia ich do raportu.

Pomiar radioaktywności próbek aerozoli powietrza – Zestaw Berthold LB9128.

Monitor Berthold LB9128 z filtrem taśmowym posiada następujące cechy:

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

Monitor LB 9128-MAXI składa się z następujących bloków:

- Zespół gromadzenia pyłów LB 9128-MAXI. Zespół ten pozwala na zainstalowanie szybkiego pomiaru Alfa-Beta oraz szybkiego pomiaru Gamma. Detektor Beta lub Alfa-Beta zamontowany jest u góry obszaru gromadzenia pyłu, co zapewnia pomiar w czasie gromadzenia aktywności.
- Detektor Beta lub odpowiednio Alfa/Beta mierzy bezpośrednio na powierzchni gromadzenia pyłu, aby nie występowało żadne opóźnienie oceny. Próbkowane powietrze jest wciągane przez płaską dyszę z filtrem z włókna szklanego.
- Cząstki Alfa/Beta mierzone są w czasie rzeczywistym za pomocą diody krzemowej (Si-diode CAM-PIPS) o powierzchni 1700 mm^2 . Zarówno dla sygnałów Beta, jak i Alfa dostępna jest kompensacja wpływu produktów rozpadu radonu metodą pseudo koincydencji. Oddzielny próg wysokiej energii cząstek Alfa (nastawiany w zakresie od 6 do 10 MeV) może być używany do oddzielnej oceny zawartości toronu (produkt rozpadu Rn-220) w powietrzu, na podstawie rozpadu Po-212 ($E_\alpha 8,78 \text{ MeV}$), względnie do poprawiania metody ABPD z dyskryminacją energii Alfa, poprzez wybór progu dyskryminacji Alfa powyżej 6 MeV.
- Kasetka ze stali nierdzewnej o stopniu zabezpieczenia przed wodą IP68 oraz przednie drzwiczki z przezroczystego pleksiglasu otaczają części narażone na wilgoć. Z tylnej strony kasetki 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. Kasetka wykonana jest w standardzie 19" i przystosowana do zamontowania w obudowie 19". Przednie drzwiczki zabezpieczone są 5 zamknięciami śrubowymi i opcjonalnym czujnikiem "Otwarte drzwiczki".
- Zespół napędowy PLC i mechanizm przesuwu 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 specjalistyczne oprogramowanie TDR.

We wspólnej obudowie TDSPI zainstalowane są:

1. Dwutorowy spektrometr TDSPI zawierający dwa niezależne tory spektrometryczne przystosowane do współpracy z sondami scyntylacyjnymi beta i/lub gamma (tor pierwszy z SSU-TD-BETA lub SSU-70, tor z CANBERRA). Każdy z nich zawiera:
 - a. zasilacz wysokiego napięcia (500-1500V; 0,3mA),
 - b. przedwzmacniacz,
 - c. wzmacniacz spektrometryczny o parametrycznie ustawianym wzmocnieniu zgrubnym (x1, x2, x4, x8) i precyzyjnym (1...4095)
 - d. analizator 512-kanałowy,
 - e. przelicznik do zliczania impulsów z 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.

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

1. Wybór aktywnej sondy scyntylicyjnej,
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

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

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 41% i zdolności rozdzielczej 1,9 keV przy energii 1332 keV wraz z analizatorem dołączonym do rejestratora komputerowego z zainstalowanym oprogramowaniem. Analiza widm rejestrowanych w 8000 kanałów prowadzona jest z zastosowaniem oprogramowania Genie – 2000, które umożliwia opracowanie matematyczne widm oraz ich wizualizację i archiwizację.

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

Do kalibracji stosuje się wzorce w geometrii naczynia cylindrycznego o średnicy 40 mm stosowanego w pomiarach zawierające mieszaninę izotopów emitujących promieniowanie gamma – „mix gamma” przygotowane z wykorzystaniem roztworu wzorcowego BW/MIX/14/16 wyprodukowanego przez Ośrodek Produkcji i Dystrybucji Izotopów w Świerku. Kalibrację przeprowadza się, wykorzystując wzorce o różnych wysokościach: 1, 3, 5, 7, 10, 15 mm, co umożliwia wybór odpowiedniej kalibracji dla próbek o różnej grubości warstwy popiołu. Dla uzyskania gęstości próbek opadu całkowitego w granicach $0,9 - 1,2 \text{ g cm}^{-3}$, 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/MIX/14/16 | | | | | |
|-------------------|---------------------|----------------|------------------------------|---------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| Data referencyjna | | | 1.01.2017 | | | | | |
| Grubość warstwy | | | 1mm | 3mm | 5mm | 7mm | 10mm | 15mm |
| Izotop | Okres półrozpadu | Energia (MeV) | Aktywność na 12.04.2018 (Bq) | | | | | |
| ²⁴¹ Am | 432,6 ± 0,6 lat | 0,026 0,060 | 54,16 ± 0,65 | 158,33 ± 1,89 | 257,71 ± 3,07 | 251,32±2,99 | 251,29±2,99 | 248,64±2,96 |
| ¹⁰⁹ Cd | 461,4 ± 1,2 dni | 0,088 | 104,63 ± 2,21 | 305,88 ± 6,46 | 497,85 ± 10,51 | 485,50±10,25 | 485,44±10,25 | 480,34±10,14 |
| ⁵⁷ Co | 271,80 ± 0,05 dni | 0,014 | 2,85 ± 0,02 | 8,32 ± 0,07 | 13,54 ± 0,11 | 13,21±1,11 | 13,20±0,11 | 13,06±0,11 |
| | | 0,122 | | | | | | |
| | | 0,136 | | | | | | |
| ¹¹³ Sn | 115,09 ± 0,03 dni | 0,255 | 2,18 ± 0,04 | 6,37 ± 0,13 | 10,36 ± 0,21 | 10,11±0,20 | 10,10±0,20 | 10,00±0,20 |
| | | 0,392 | | | | | | |
| ⁸⁵ Sr | 64,850 ± 0,007 dni | 0,514 | 0,252 ± 0,003 | 0,736 ± 0,009 | 1,199 ± 0,014 | 1,17±0,01 | 1,17±0,01 | 1,16±0,01 |
| ¹³⁷ Cs | 30,05 ± 0,08 lat | 0,662 | 43,39 ± 0,65 | 126,84 ± 1,90 | 206,45 ± 3,09 | 201,33±3,01 | 201,31±3,01 | 199,19±2,98 |
| ⁵⁴ Mn | 312,13 ± 0,03 dni | 0,835 | 24,78 ± 0,37 | 72,45 ± 1,09 | 117,92 ± 1,77 | 115,00±1,73 | 114,98±1,73 | 113,78±1,71 |
| ⁶⁵ Zn | 244,01 ± 0,09 dni | 1,116 | 28,46 ± 0,34 | 83,19 ± 0,99 | 135,41 ± 1,61 | 132,05±1,57 | 132,03±1,57 | 130,64±1,55 |
| | | | | | | | | |
| ⁶⁰ Co | 5,2710 ± 0,0008 lat | 1,173 | 47,20 ± 0,39 | 137,84 ± 1,13 | 224,36 ± 1,83 | 218,79±1,79 | 218,76±1,79 | 216,46±1,77 |
| | | 1,332 | | | | | | |

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

4. Rozpuszczanie popiołu.

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

5. Wytrącanie chromianu baru.

Do zlewki z roztworem dodaje się 1 ml nośnika baru, kilka kropli czerwieni metylowej, 1 ml kwasu octowego, 2 ml octanu amonu. Następnie dodaje się stężony amoniak do uzyskania pH 5,5 (kolor pomarańczowo – żółty). Próbkę ogrzewa się do 90°C , dodaje 1 ml chromianu sodu i ponownie sprowadza pH do 5,5 za pomocą amoniaku. Roztwór ogrzewa się do wytrącenia żółtego osadu chromianu baru. Następnie po ostygnięciu roztwór przesącza się przez sączek. Osad 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 próbkę pozostawia się na 18 dni.

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

7. Wytrącanie wodorotlenku itru.

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

8. Wytrącanie szczawianów itru.

Osad wodorotlenku itru rozpuszcza się w kilku mililitrach HNO_3 (1:1). Następnie 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 ^{90}Y równoważnej aktywności ^{90}Sr powinien być wykonany nie później niż 2 godziny od chwili oddzielenia $\text{Y}(\text{OH})_3$ od reszty roztworu. Jeżeli pomiar zostanie przeprowadzony później, należy uwzględnić rozpad promieniotwórczy ^{90}Y .

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

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

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

gdzie:

A – aktywność [Bq m^{-2}]

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

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

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

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

gdzie:

t_0 – godzina oddzielenia osadu od roztworu

t_1 – godzina odpowiadająca połowie czasu pomiaru próbki

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

Błąd pomiaru:

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

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

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

3. Wyniki i omówienie wyników z 2019 roku oraz w odniesieniu do okresu 2000-2018

3.1. Moc dawki promieniowania gamma w powietrzu

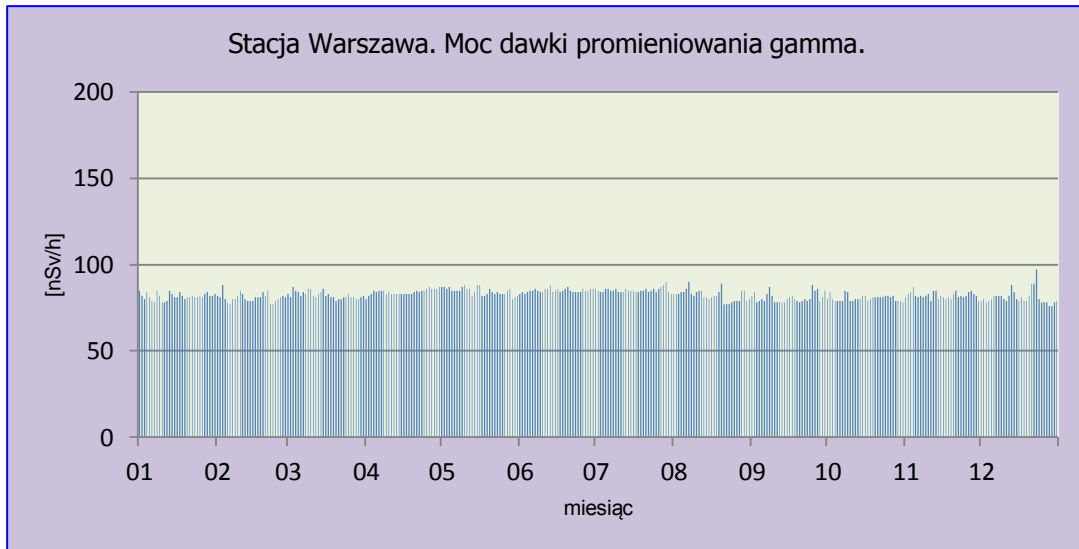
Moc dawki promieniowania gamma definiujemy jako ilość energii promieniowania jonizującego przekazanej jednostce masy w jednostce czasu.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

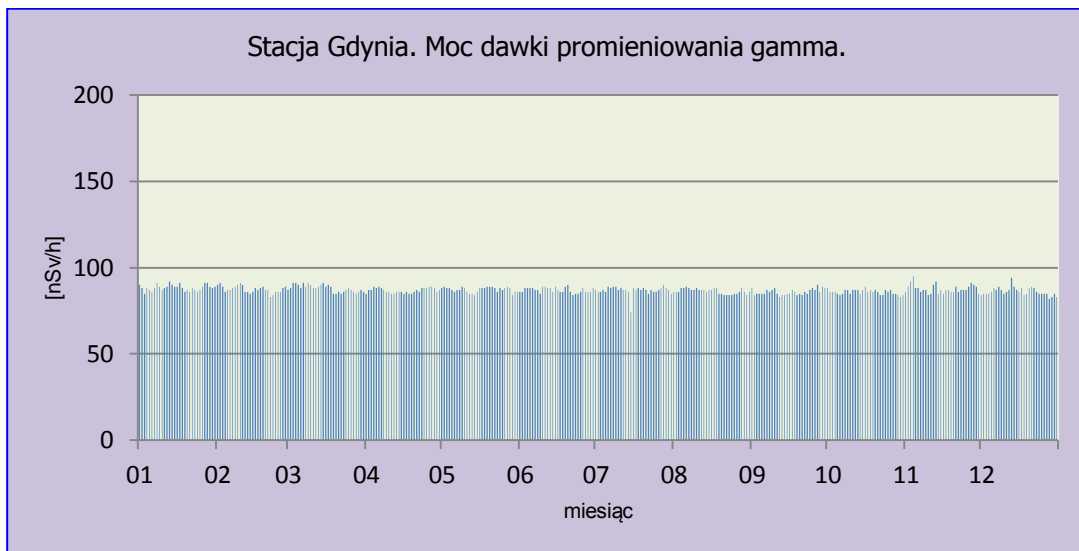
Poziom promieniowania gamma związany z obecnością izotopów emitujących ten rodzaj promieniowania określany jest w atmosferze za pomocą mocy dawki. W 2019 roku wartości mocy dawki promieniowania gamma w atmosferze mierzone były w reżimie dobowym na 9 stacjach IMGW-PIB: Warszawa, Gdynia, Mikołajki, Gorzów Wielkopolski, Świnoujście, Legnica, Włodawa, Zakopane, Lesko. Otrzymane wartości zmieniały się w szerokim zakresie (Rys. 2-10), od najniższej średniej miesięcznej wartości 76,8 nSv h⁻¹ uzyskanej w czerwcu na stacji Świnoujście do maksymalnej zarejestrowanej w lipcu w Zakopanem – 119,9 nSv h⁻¹ (Tabela 1). Najniższa średnia roczna moc dawki promieniowania gamma uzyskana z wartości dobowych – 77,8 nSv h⁻¹ charakteryzowała Świnoujście i stację Włodawa – 80,2 nSv h⁻¹, oraz Warszawa – 82,6 nSv h⁻¹. Zbliżone wyniki odnotowano odpowiednio na stacjach: Gdynia, Gorzów Wielkopolski, Legnica (<100 nSv h⁻¹). Najwyższą średnią roczną wartość mocy dawki odnotowano w Zakopanem – 109,7 nSv h⁻¹, oraz w Lesku – 105,6 nSv h⁻¹ ma to jednoznacznie związek z budową geologiczną tego obszaru oraz wysokością n.p.m. stacji pomiarowych. Na stacjach zlokalizowanych w miejscowościach położonych znacznie niżej względem poziomu morza: Gdynia, Gorzów Wielkopolski, Warszawa, Włodawa, Świnoujście średnia roczna moc dawki promieniowania gamma była niższa niż uzyskana dla średniej z całej Polski. Na stacjach: Zakopane, Lesko, Mikołajki i Legnica wartość przekroczyła średnią odnotowaną dla całej Polski równą 92,6 nSv h⁻¹ (Tabela 1). Otrzymane wyniki wskazują na brak zmienności sezonowej, co oznacza, że głównym elementem determinującym moc dawki promieniowania gamma jest lokalizacja geograficzna.

Tabela 1. Średnie miesięczne wartości mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu w 2019 roku, nSv h⁻¹.

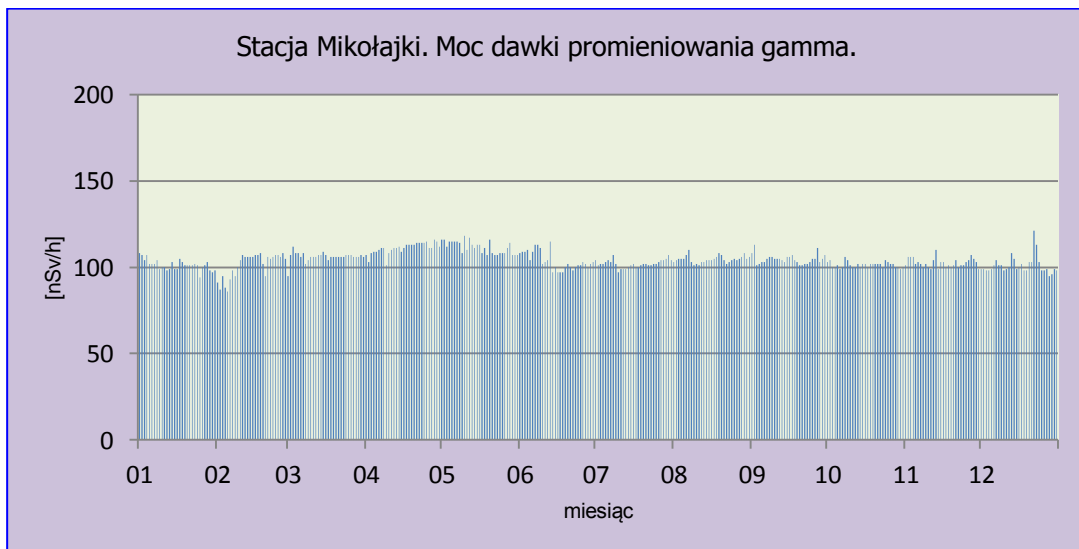
| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia |
|-----------------------------------------------|----------|--------|-----------|--------------|-------------|---------|---------|----------|-------|-------------|
| Styczeń | 81,6 | 88,4 | 101,3 | 86,3 | 78,5 | 96,1 | 77,4 | 84,1 | 93,1 | 87,4 |
| Luty | 80,9 | 87,5 | 101,3 | 85,4 | 77,1 | 93,1 | 77,0 | 83,8 | 101,4 | 87,5 |
| Marzec | 82,4 | 88,0 | 106,1 | 85,6 | 77,0 | 94,6 | 78,9 | 106,3 | 103,6 | 91,4 |
| Kwiecień | 84,1 | 86,8 | 111,0 | 86,4 | 77,0 | 100,5 | 79,8 | 116,1 | 105,7 | 94,2 |
| Maj | 84,6 | 87,2 | 111,5 | 86,8 | 77,6 | 98,7 | 80,5 | 114,1 | 104,5 | 93,9 |
| Czerwiec | 85,0 | 87,0 | 103,7 | 88,0 | 76,8 | 100,9 | 80,2 | 115,5 | 103,2 | 93,4 |
| Lipiec | 85,2 | 86,8 | 102,0 | 88,2 | 78,0 | 103,8 | 81,2 | 119,9 | 108,1 | 94,8 |
| Sierpień | 82,2 | 86,3 | 104,6 | 87,6 | 77,1 | 104,1 | 80,6 | 116,8 | 109,5 | 94,3 |
| Wrzesień | 80,9 | 85,9 | 104,7 | 86,2 | 77,9 | 101,6 | 81,3 | 115,4 | 107,7 | 93,5 |
| Październik | 80,5 | 85,9 | 101,4 | 87,0 | 77,4 | 101,2 | 80,9 | 115,6 | 109,6 | 93,3 |
| Listopad | 82,2 | 87,7 | 102,5 | 88,4 | 80,7 | 101,2 | 83,2 | 118,2 | 112,2 | 95,1 |
| Grudzień | 81,1 | 86,2 | 101,1 | 86,2 | 78,3 | 97,4 | 81,6 | 109,2 | 108,9 | 92,2 |
| Minimalna średnia miesięczna w 2019 r. | 80,5 | 85,9 | 101,1 | 85,4 | 76,8 | 93,1 | 77,0 | 83,8 | 93,1 | 86,3 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 85,2 | 88,4 | 111,5 | 88,4 | 80,7 | 104,1 | 83,2 | 119,9 | 112,2 | 97,0 |
| Średnia roczna dobową w 2019 r. | 82,6 | 87,0 | 104,3 | 86,8 | 77,8 | 99,5 | 80,2 | 109,7 | 105,6 | 92,6 |



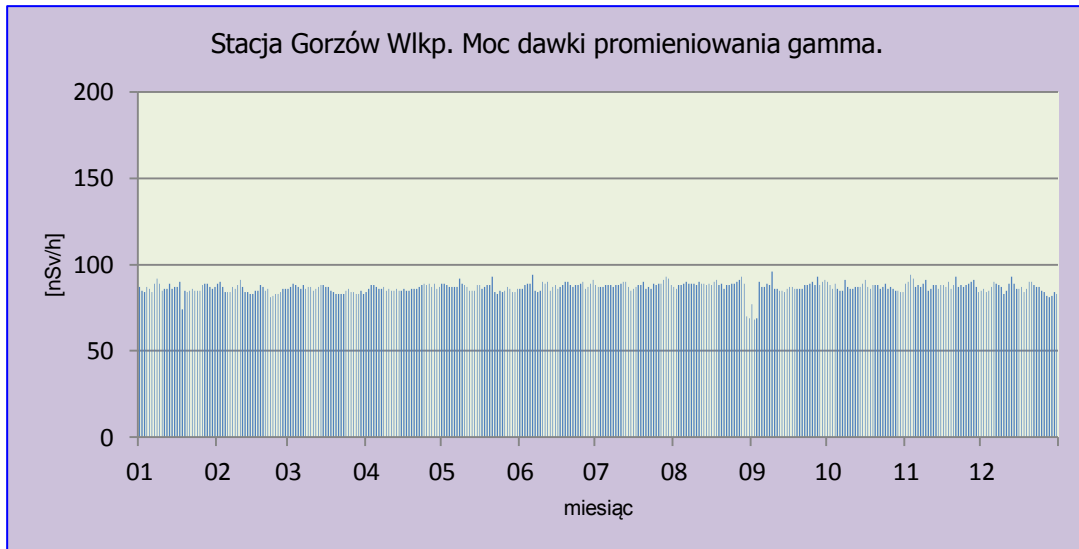
Rys. 2. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Warszawa w 2019 roku.



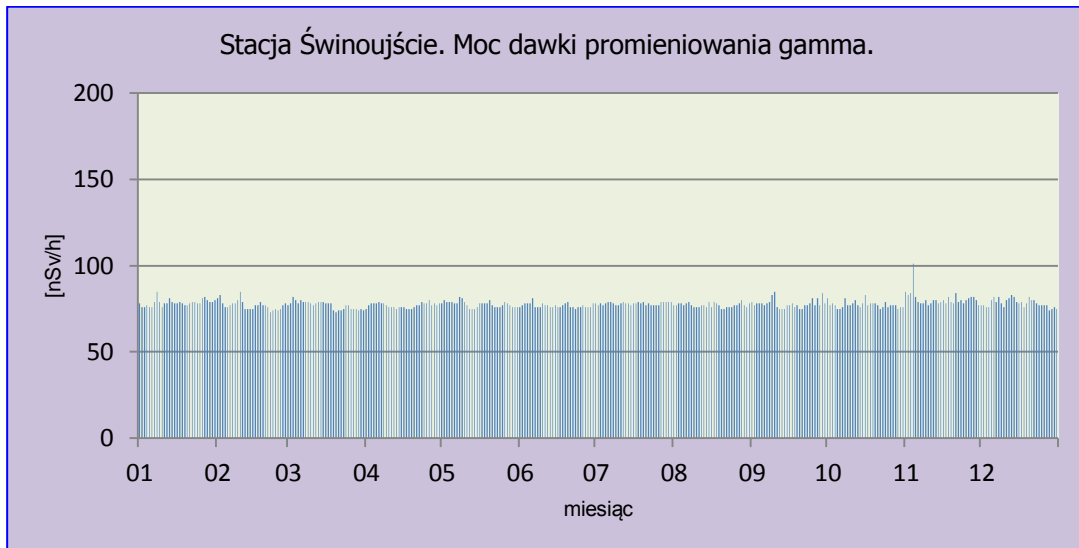
Rys. 3. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gdynia w 2019 roku.



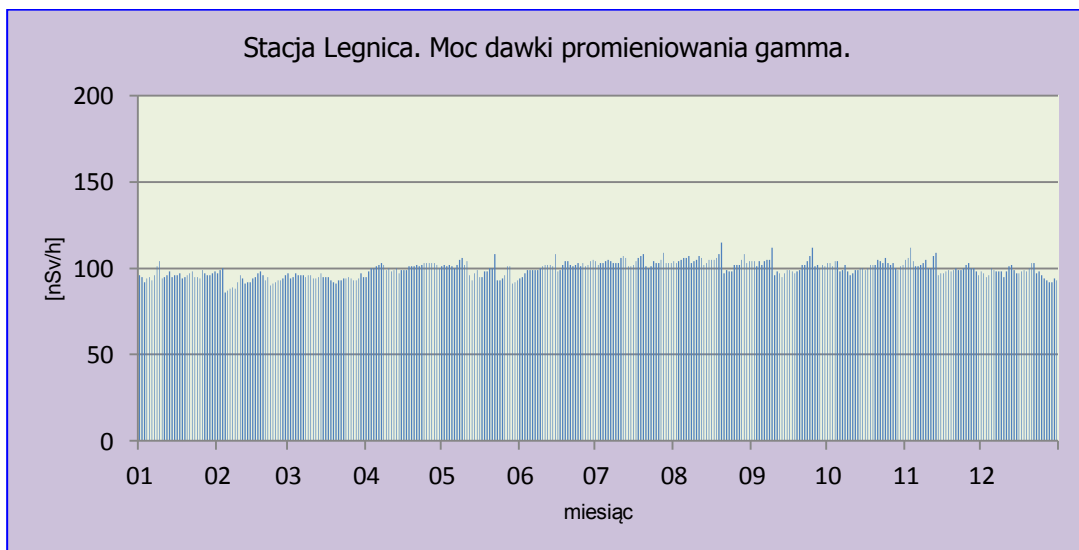
Rys. 4. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Mikołajki w 2019 roku.



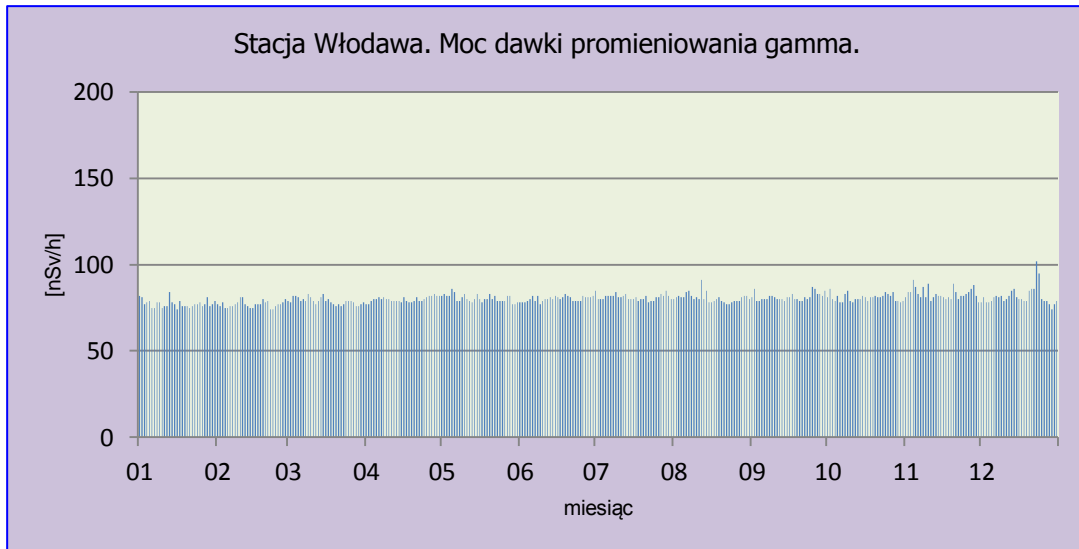
Rys. 5. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gorzów Wlkp. w 2019 roku.



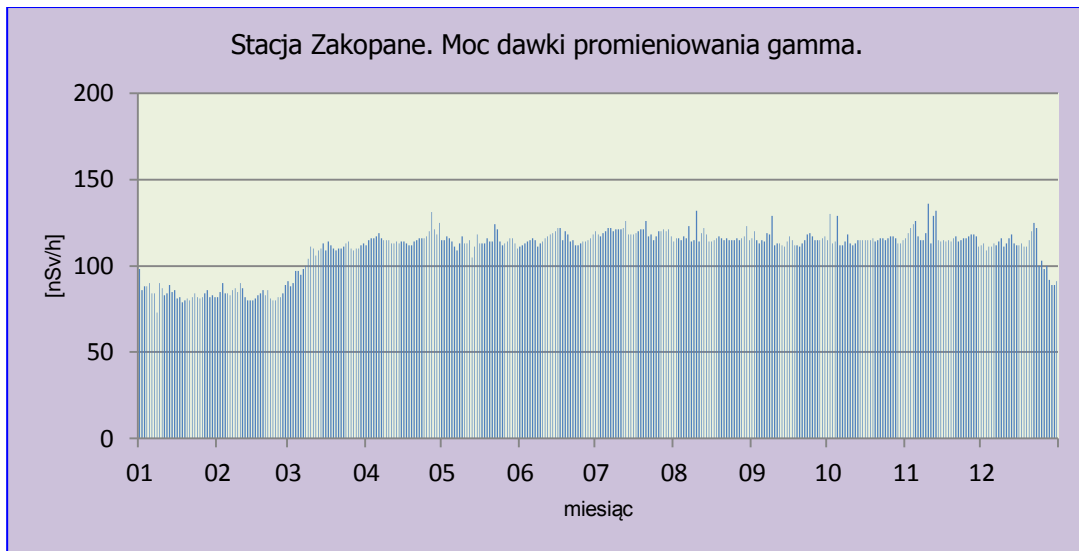
Rys. 6. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Świnoujście w 2019 roku.



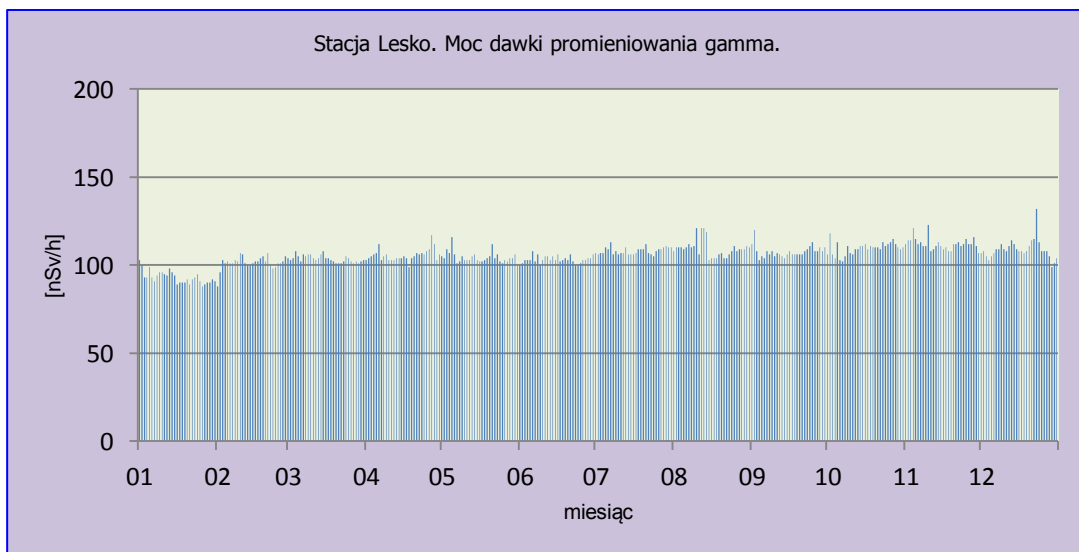
Rys. 7. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Legnica w 2019 roku.



Rys. 8. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Włodawa w 2019 roku.



Rys. 9. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Zakopane w 2019 roku.



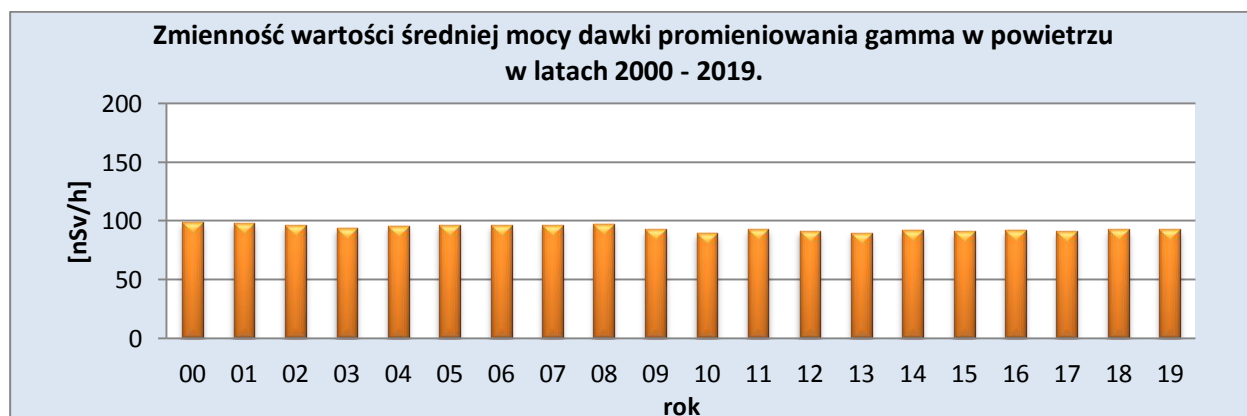
Rys. 10. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Lesko w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 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 2019 roku wynosiła $92,6 \text{ nSv h}^{-1}$ i była zbliżona do obserwowanej w roku poprzednim $92,5 \text{ nSv h}^{-1}$ (Tabela 2, Rys. 11). W latach 2000 - 2018 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. Średnia wartość mocy dawki promieniowania gamma uzyskana ze średnich rocznych w badanych latach wynosi $94,1 \text{ nSv h}^{-1}$.

Tabela 2. Wartość średniej rocznej mocy dawki promieniowania gamma w latach 2000 – 2019, 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 | 92,0 |
| 2015 | 91,5 |
| 2016 | 92,1 |
| 2017 | 90,9 |
| 2018 | 92,5 |
| 2019 | 92,6 |
| Średnia | 94,1 |
| Minimalna | 89,6 |
| Maksymalna | 99,1 |



Rys. 11. Średnia roczna moc dawki promieniowania gamma w latach 2000-2019.

3.2. Radioaktywność próbek aerozoli w powietrzu

Pochodzenie promieniotwórczości naturalnej 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. Skały skorupy ziemskiej zawierają izotopy promieniotwórcze wchodzące w skład trzech szeregów promieniotwórczych, w ramach których zachodzą przemiany jądrowe i przekształcanie jednych atomów w inne. W wyniku przemian powstają również izotopy gazowe, które kształtują poziom radioaktywności atmosfery. Każdy rejon ma inny poziom promieniowania naturalnego wynikający właśnie z różnic geologicznych i związanej z tym różnej zawartości izotopów naturalnych w środowisku. W rejonach górzystych obserwujemy zwiększone naturalne promieniowanie gamma z racji skalnego podłoża oraz otoczenia.

Stężenie izotopów promieniotwórczych w atmosferze zależy również od warunków meteorologicznych.

W 2019 roku na 7 stacjach badawczych zostały wykonane pomiary poziomu radioaktywności w próbkach aerozoli związane z obecnością izotopów emitujących promieniowanie alfa, pochodzenia naturalnego i sztucznego, oraz z obecnością izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta.

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

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

3.2.1 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego emitujących promieniowanie alfa

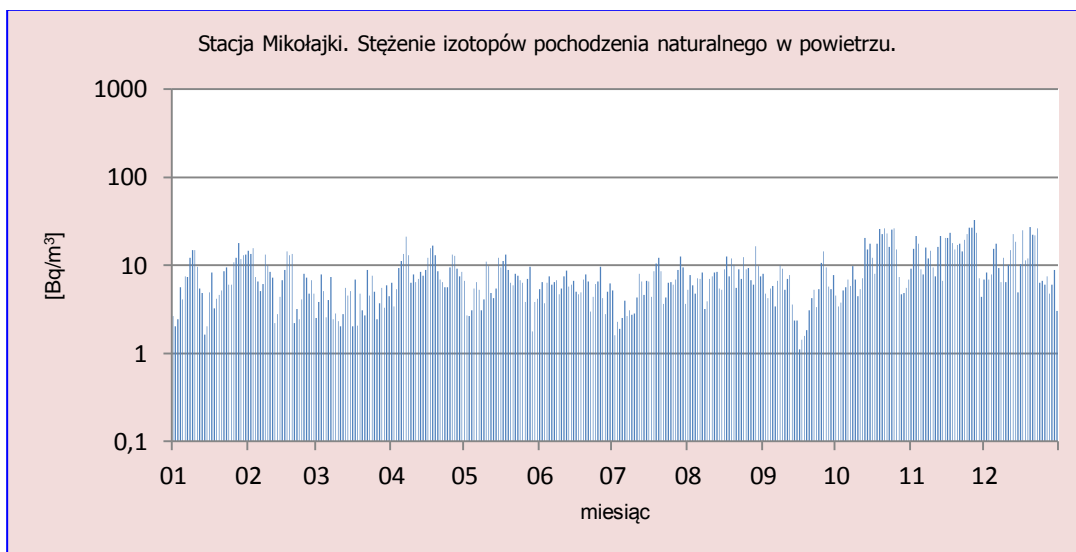
Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

Średnie miesięczne stężenia izotopów promieniotwórczych alfa w 2019 roku zmieniały się w szerokim zakresie (Tabela 3, Rys. 12-18). Minimalną średnią miesięczną wartością $1,8 \text{ Bq m}^{-3}$ charakteryzowały się aerozole zebrane w marcu na stacji Świnoujście, gdzie najwyższa uzyskana wartość, odnotowana dla tej miejscowości w listopadzie wynosiła $9,4 \text{ Bq m}^{-3}$. Najwyższe średnie miesięczne stężenia izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa, przypadające na miesiąc listopad ($16,5 \text{ Bq m}^{-3}$) odnotowano w Mikołajkach, oraz w październiku w Legnicy ($14,9 \text{ Bq m}^{-3}$). Wartości średnich rocznych obliczonych na podstawie wartości dobowych, czyli średnich z 365 dni dla każdej stacji mieściły się w zakresie od $3,9 \text{ Bq m}^{-3}$ (Świnoujście) do $10,6 \text{ Bq m}^{-3}$ (Legnica).

Analizując miesięczne wartości średnie obliczone na podstawie danych z 7 stacji, stwierdzono, że najwyższe wartości notowane były w okresie jesiennym: październik ($12,5 \text{ Bq m}^{-3}$), listopad ($10,6 \text{ Bq m}^{-3}$) a najniższe w marcu ($3,9 \text{ Bq m}^{-3}$) i maju ($5,0 \text{ Bq m}^{-3}$). Średnia roczna z całego roku ze wszystkich stacji w 2019 roku wyniosła $7,5 \text{ Bq m}^{-3}$ i była o $0,4 \text{ Bq m}^{-3}$ niższa niż w roku ubiegłym.

Tabela 3. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach w 2019, Bq m⁻³.

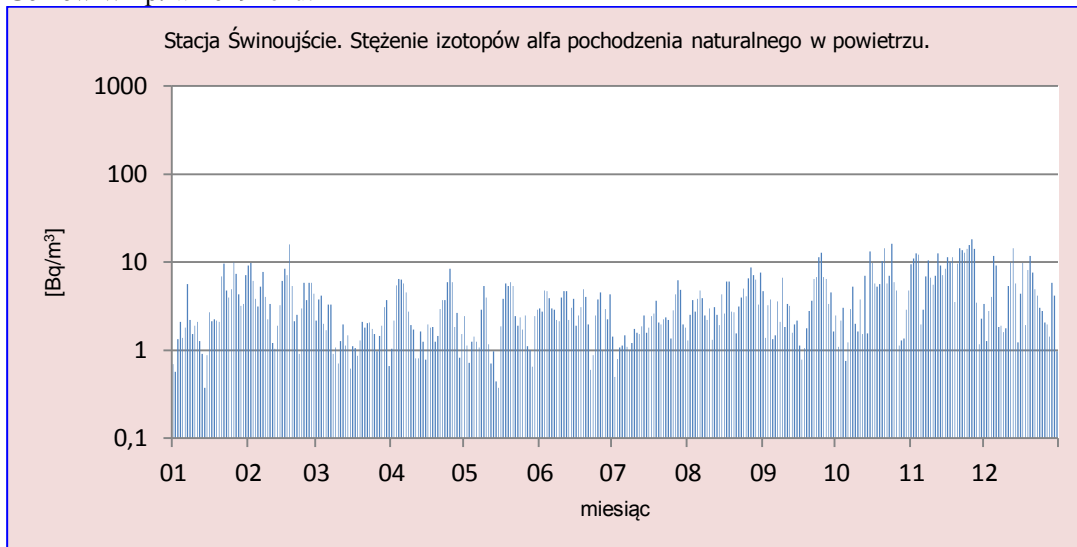
| Miesiąc | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|--------------|-------------|---------|---------|----------|-------|------------|
| Styczeń | 7,7 | 4,6 | 3,3 | 6,9 | 5,3 | 8,7 | 9,4 | 6,5 |
| Luty | 7,8 | 7,2 | 5,0 | 13,6 | 4,6 | 6,6 | 6,3 | 7,3 |
| Marzec | 4,3 | 3,2 | 1,8 | 5,6 | 2,5 | 4,7 | 5,2 | 3,9 |
| Kwiecień | 9,6 | 4,4 | 3,0 | 13,8 | 3,8 | 7,6 | 6,6 | 7,0 |
| Maj | 6,5 | 3,9 | 2,3 | 7,0 | 4,2 | 6,3 | 5,0 | 5,0 |
| Czerwiec | 5,9 | 4,5 | 3,1 | 10,2 | 4,7 | 10,4 | 6,4 | 6,5 |
| Lipiec | 5,8 | 4,2 | 2,1 | 6,9 | 4,2 | 8,8 | 8,2 | 5,7 |
| Sierpień | 7,9 | 6,6 | 3,9 | 13,3 | 5,9 | 12,9 | 9,9 | 8,6 |
| Wrzesień | 5,6 | 6,4 | 3,8 | 10,2 | 6,3 | 10,7 | 9,9 | 7,5 |
| Październik | 12,0 | 9,4 | 4,9 | 14,9 | 9,8 | 12,1 | 11,0 | 10,6 |
| Listopad | 16,5 | 11,0 | 9,4 | 13,7 | 13,5 | 12,0 | 11,5 | 12,5 |
| Grudzień | 12,1 | 6,6 | 4,9 | 11,6 | 9,0 | 11,1 | 6,6 | 8,8 |
| Min. średnia miesięczna | 4,3 | 3,2 | 1,8 | 5,6 | 2,5 | 4,7 | 5,0 | 3,9 |
| Maks. średnia miesięczna | 16,5 | 11,0 | 9,4 | 14,9 | 13,5 | 12,9 | 11,5 | 12,8 |
| Średnia roczna na podstawie wartości dobowych dla 2019r. | 8,5 | 6,0 | 3,9 | 10,6 | 6,2 | 9,3 | 8,0 | 7,5 |



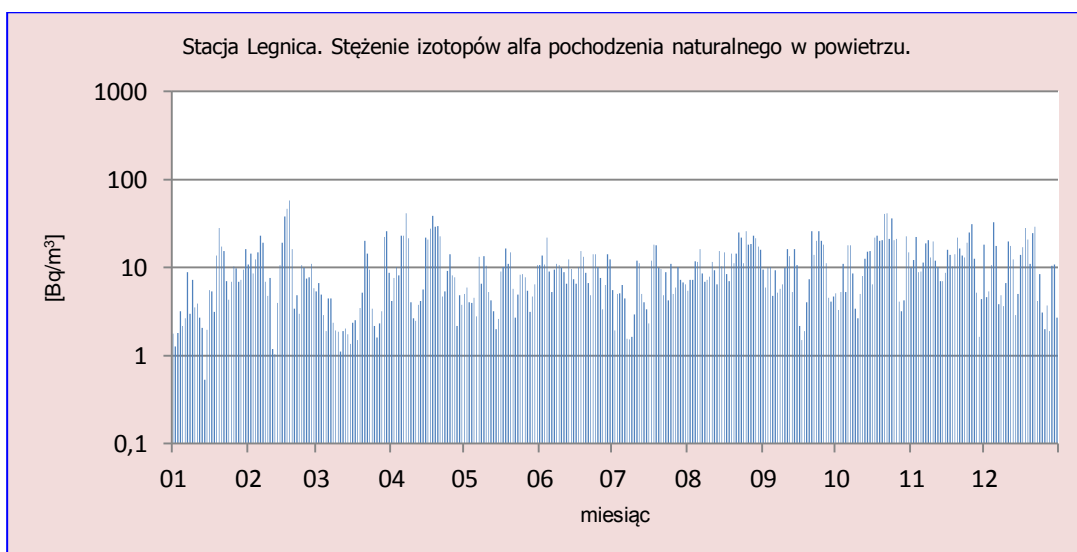
Rys.12. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Mikołajki w 2019 roku.



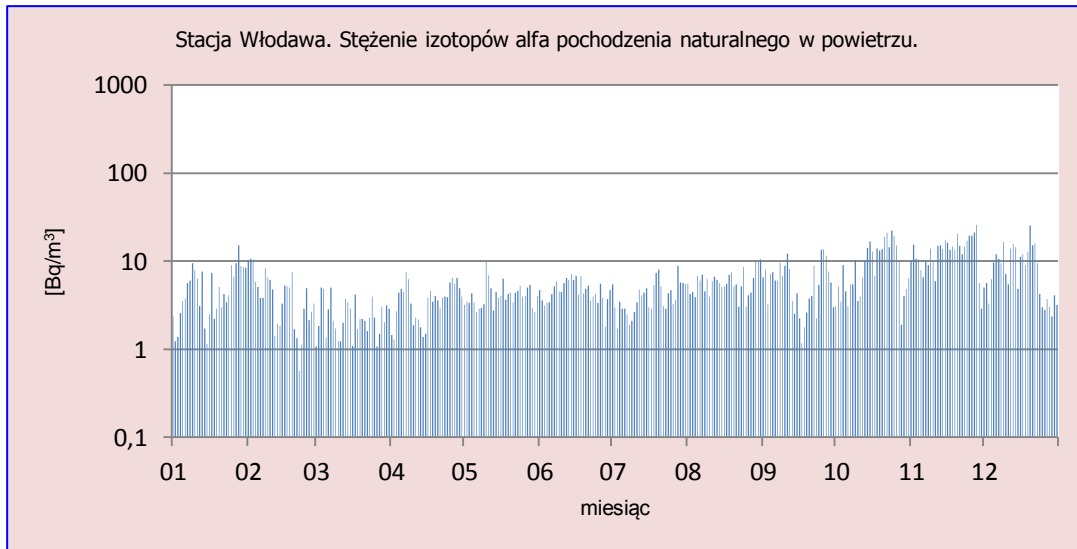
Rys.13. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp. w 2019 roku.



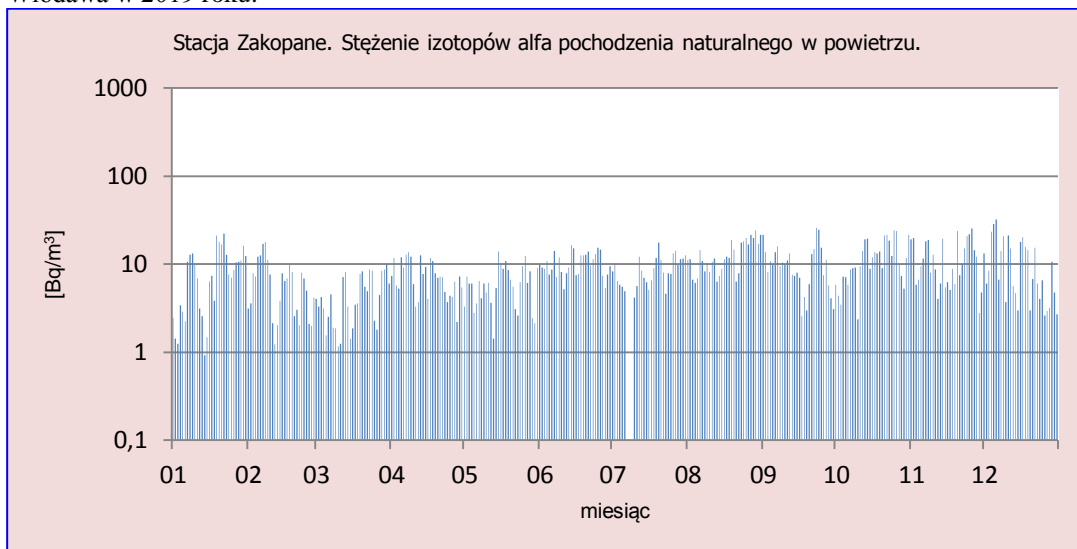
Rys.14. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Świnoujście w 2019 roku.



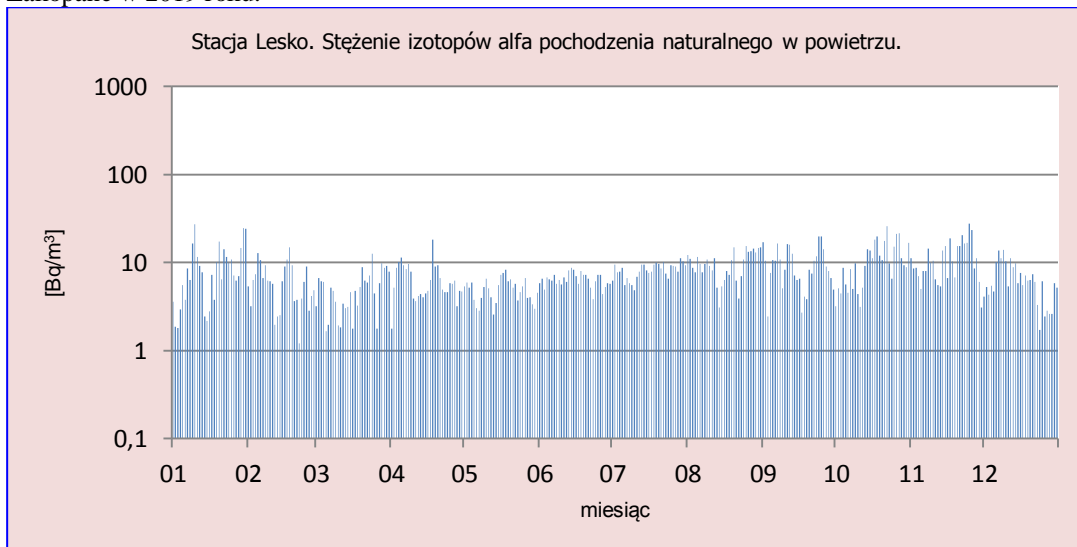
Rys.15. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Legnica w 2019 roku.



Rys.16. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Włodawa w 2019 roku.



Rys. 17. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Zakopane w 2019 roku.



Rys.18. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Lesko w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W roku 2019 średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolach w powietrzu było niższe niż w roku ubiegłym i wynosiło $7,5 \text{ Bq m}^{-3}$ podobnie jak w roku 2007 (Tabela 4). Zbliżone wartości otrzymano również w latach: 2005, 2011 i 2014 gdzie wartość stężenia była równa $7,4 \text{ Bq m}^{-3}$. W okresie ostatnich 20 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 roku 2008. Średnia obliczona na podstawie danych z okresu 2000 – 2019 wynosi $7,1 \text{ Bq m}^{-3}$. 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 – 2019, 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 |
| 2017 | 6,4 |
| 2018 | 7,9 |
| 2019 | 7,5 |
| Średnia | 7,1 |
| Maksymalna | 8,6 |
| Minimalna | 4,9 |

3.2.2 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa

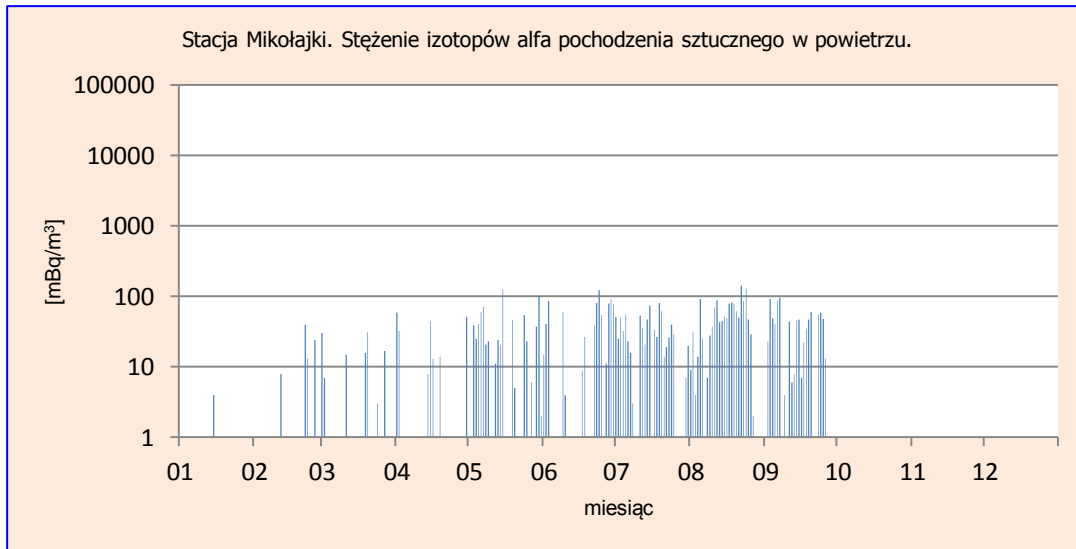
Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie alfa pochodzenia antropogenicznego w 2019 roku zmieniały się w stosunkowo szerokim zakresie od 0 do 0,415 Bq m⁻³. Miesięczne wartości minimalne zmieniały się w przedziale od 0 Bq m⁻³ (Mikołajki) do 0,081 Bq m⁻³ (Legnica), natomiast maksymalne w przedziale od 0,045 Bq m⁻³ (Mikołajki) do 0,415 Bq m⁻³ (Legnica) (Tabela 5, Rys. 19-25). Maksymalna średnia miesięczna wartość w Legnicy wystąpiła we wrześniu.

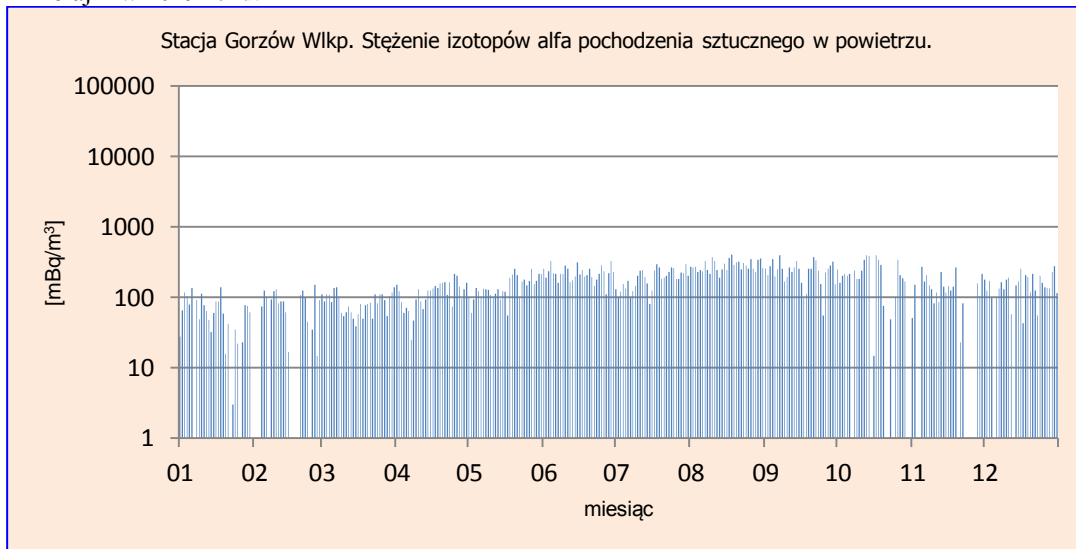
Średnia obliczona dla kolejnych miesięcy na podstawie danych ze wszystkich stacji zmieniała się w szerokim zakresie od 0,034 Bq m⁻³ (styczeń) do 0,140 Bq m⁻³ – wartości wyznaczonej z danych we wrześniu. Średnia roczna dobową, czyli średnia ze wszystkich dni, kiedy były uzyskane pomiary obliczona dla wszystkich stacji, jest prawie dwa razy wyższa niż w ubiegłym roku i utrzymuje się na poziomie 0,086 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, mimo wspomnianej dwa razy wyższej wartości w stosunku do roku poprzedniego jest nadal bardzo niewielki i wynosi zaledwie 1,15 % promieniowania pochodzenia naturalnego.

Tabela 5. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w aerozolu w 2019 roku, Bq m⁻³.

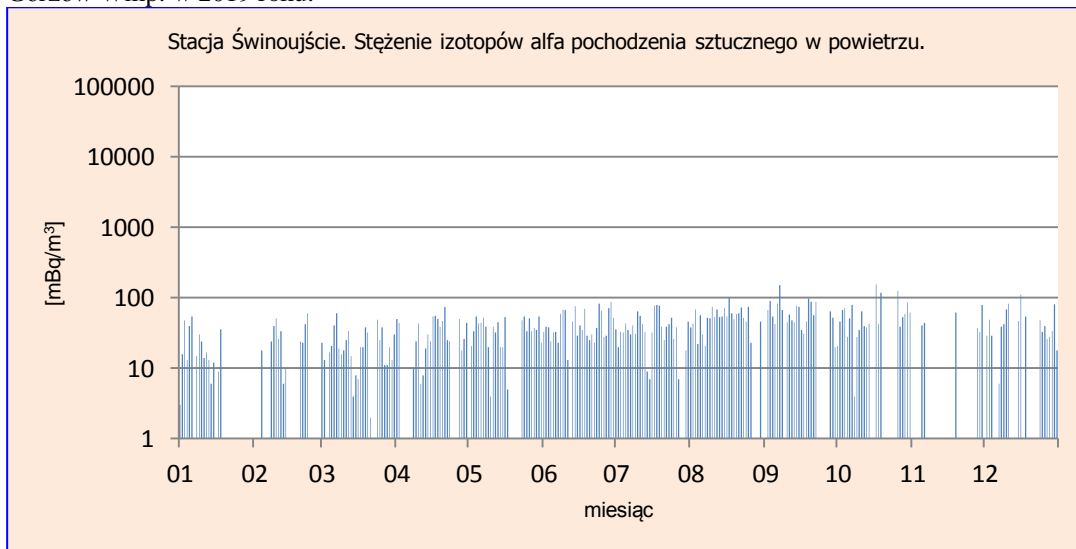
| Miesiąc | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|--------------|-------------|---------|---------|----------|-------|--------------|
| Styczeń | 0,000 | 0,058 | 0,011 | 0,113 | 0,023 | 0,029 | 0,005 | 0,034 |
| Luty | 0,003 | 0,059 | 0,013 | 0,081 | 0,033 | 0,058 | 0,014 | 0,037 |
| Marzec | 0,004 | 0,087 | 0,020 | 0,111 | 0,068 | 0,046 | 0,026 | 0,052 |
| Kwiecień | 0,007 | 0,118 | 0,026 | 0,130 | 0,084 | 0,048 | 0,044 | 0,065 |
| Maj | 0,024 | 0,145 | 0,029 | 0,227 | 0,092 | 0,074 | 0,059 | 0,093 |
| Czerwiec | 0,027 | 0,224 | 0,043 | 0,336 | 0,099 | 0,073 | 0,043 | 0,121 |
| Lipiec | 0,027 | 0,190 | 0,036 | 0,276 | 0,091 | 0,117 | 0,039 | 0,111 |
| Sierpień | 0,045 | 0,286 | 0,047 | 0,366 | 0,107 | 0,072 | 0,035 | 0,137 |
| Wrzesień | 0,030 | 0,240 | 0,049 | 0,415 | 0,082 | 0,126 | 0,041 | 0,140 |
| Październik | 0,000 | 0,175 | 0,044 | 0,338 | 0,054 | 0,057 | 0,042 | 0,101 |
| Listopad | 0,000 | 0,106 | 0,010 | 0,294 | 0,009 | 0,032 | 0,023 | 0,068 |
| Grudzień | 0,000 | 0,145 | 0,028 | 0,246 | 0,021 | 0,038 | 0,028 | 0,072 |
| Minimalna średnia miesięczna | 0,000 | 0,058 | 0,010 | 0,081 | 0,009 | 0,029 | 0,005 | 0,027 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 0,045 | 0,286 | 0,049 | 0,415 | 0,107 | 0,126 | 0,059 | 0,155 |
| Średnia roczna na podstawie wartości dobowych dla 2019r. | 0,014 | 0,153 | 0,030 | 0,245 | 0,064 | 0,064 | 0,033 | 0,086 |



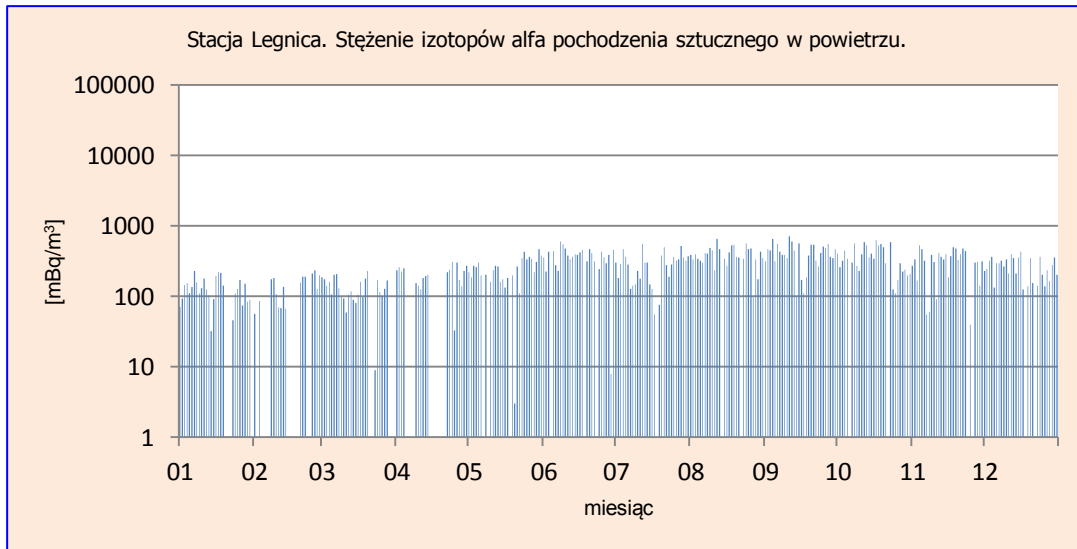
Rys.19. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Mikołajki w 2019 roku.



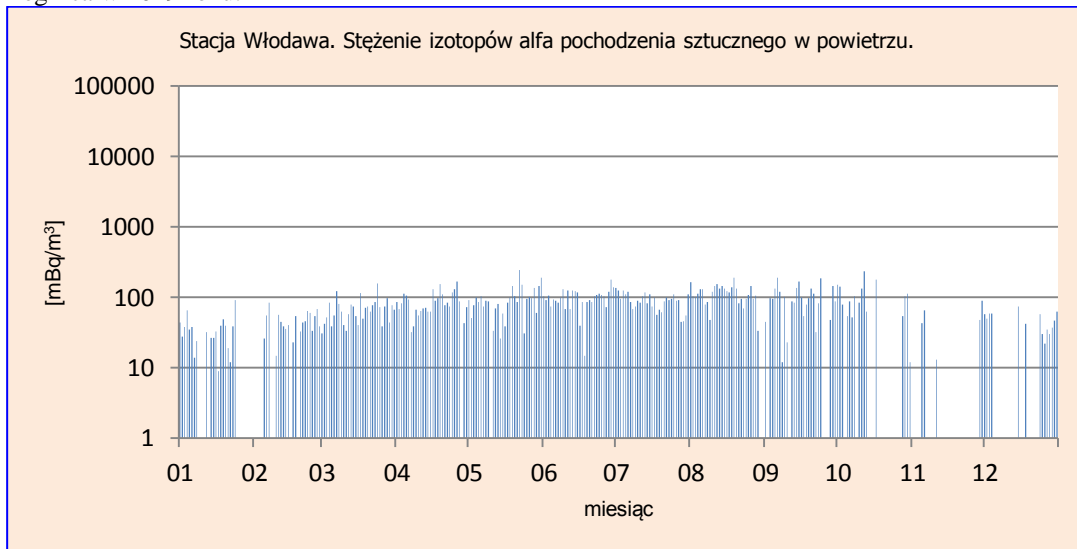
Rys.20. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Gorzów Wlkp. w 2019 roku.



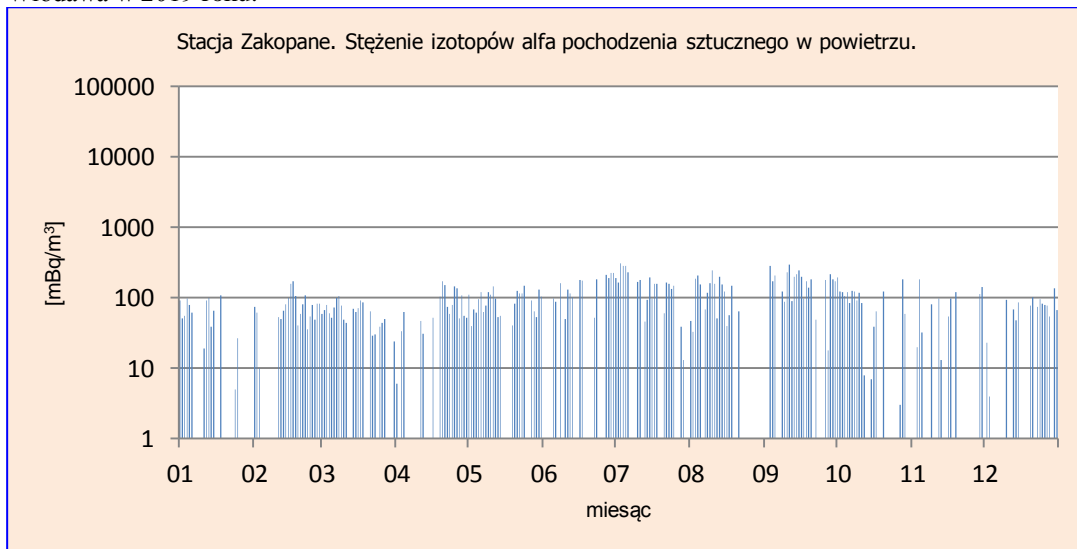
Rys. 21. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Świnoujście w roku 2019.



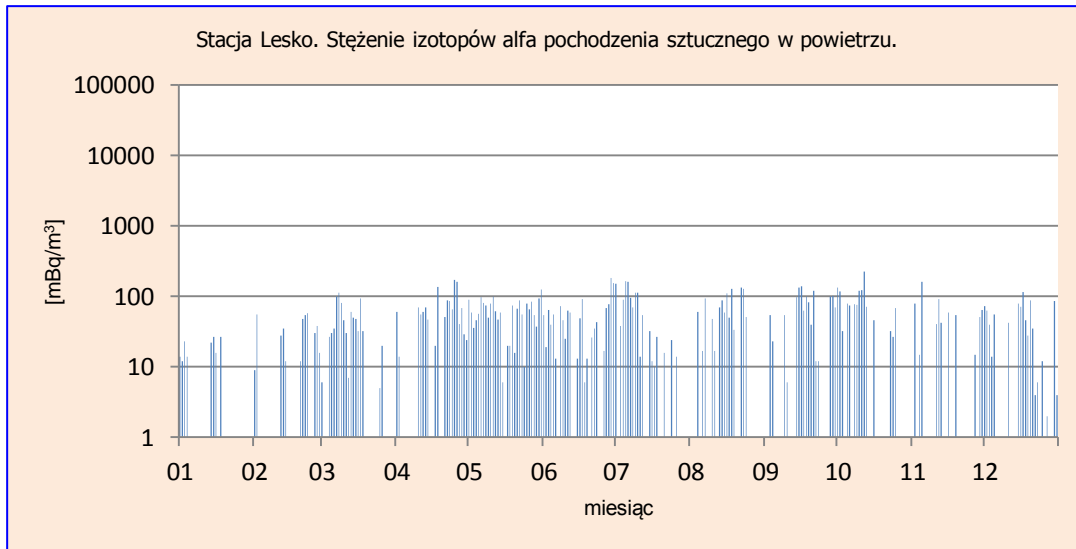
Rys.22. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Legnica w 2019 roku.



Rys. 23. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Włodawa w 2019 roku.



Rys.24. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Zakopane w 2019 roku.



Rys.25. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w 2019 roku wyniosło $0,086 \text{ Bq m}^{-3}$ i było prawie dwukrotnie wyższe niż w roku poprzednim. Odnotowana wartość jest także najwyższą spośród średnich rocznych stężeń obserwowanych w latach 2000 – 2019. Należy jednak zauważyć, że są to nadal bardzo niskie wartości w porównaniu z promieniowaniem naturalnym. Najniższe średnie roczne stężenie w tym okresie $0,004 \text{ Bq m}^{-3}$ odnotowano w 2001 roku. Średnie stężenie wyznaczone dla omawianego okresu wyniosło $0,035 \text{ Bq m}^{-3}$. (Tabela 6).

Tabela 6. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa pochodzenia sztucznego w latach 2000 – 2019, 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 | | |
| 2017 | 0,055 | Średnia | 0,035 |
| 2018 | 0,044 | Maksymalna | 0,086 |
| 2019 | 0,086 | Minimalna | 0,004 |

3.2.3 Stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta

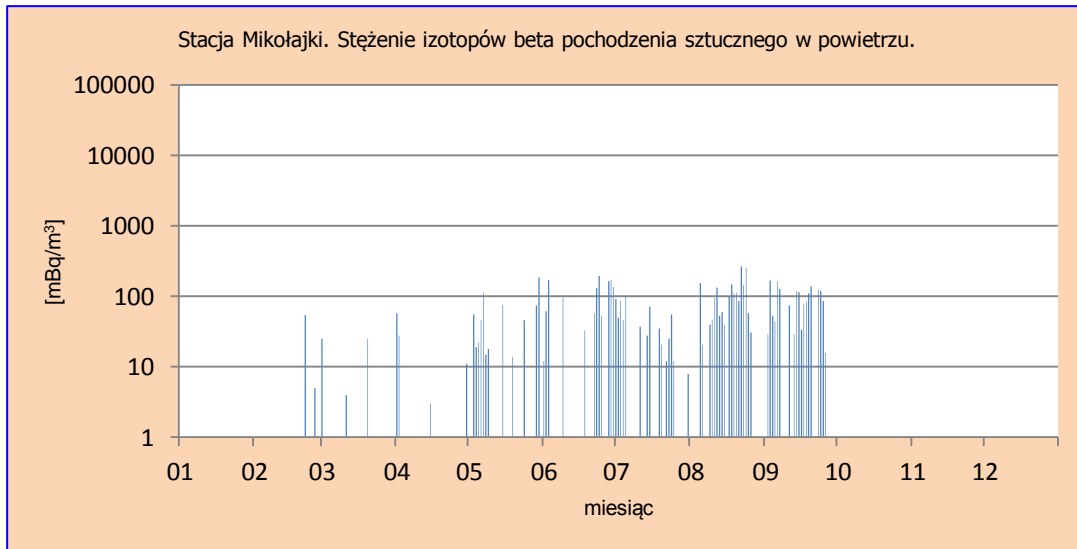
Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

Średnie wartości stężeń izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta mieściły się w zakresie od 0 Bq m⁻³ - średniej miesięcznej zanotowanej w miesiącach od października do stycznia na stacji Mikołajki do 0,990 Bq m⁻³ charakterystycznej dla Gorzowa Wielkopolskiego w sierpniu – (Tabela 7, Rys. 26-32).

Najwyższe średnie wartości roczne obliczone na podstawie średnich uzyskanych dla wszystkich miesięcy zarejestrowano na stacjach: Legnica (0,633 Bq m⁻³) i Gorzów Wielkopolski (0,606 Bq m⁻³). Najniższą średnią roczną wartość zanotowano w Mikołajkach 0,018 Bq m⁻³, która była 18 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 0,185 Bq m⁻³ (styczeń) do 0,498 Bq m⁻³ (sierpień). Najwyższe wyniki otrzymano w miesiącach od czerwca do września. Średnia dla tego okresu wyniosła 0,455 Bq m⁻³ i była o 0,177 Bq m⁻³ wyższa niż średnia dla pozostałych miesięcy. Taki układ sugeruje zależność aktywności beta w aerozolach od sezonu, wskazując na większe stężenia w miesiącach letnich.

Tabela 7. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach w 2019 roku, Bq m⁻³.

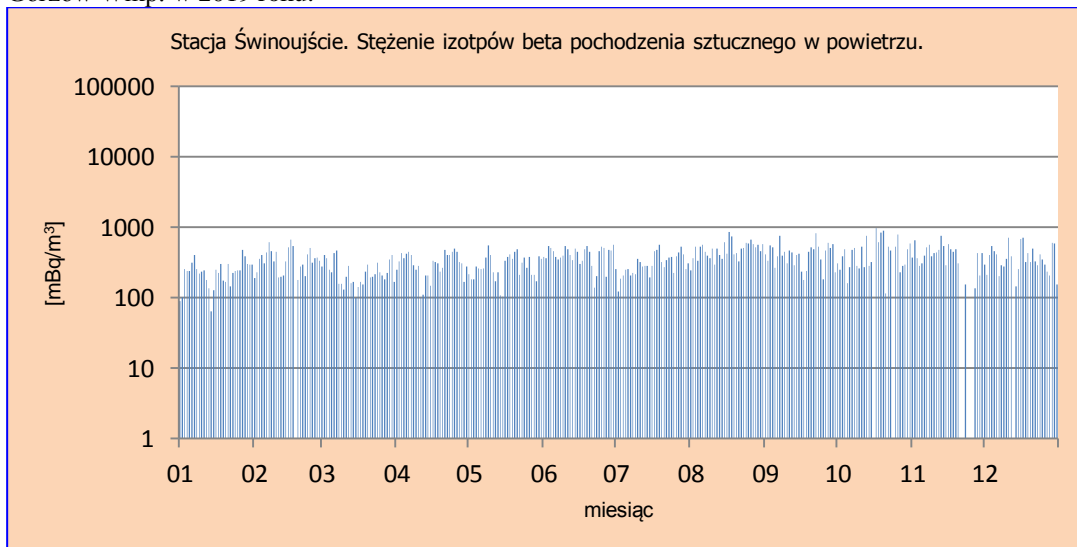
| Miesiąc | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Swinoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Srednia |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|--------------|-------------|---------|---------|----------|-------|--------------|
| Styczeń | 0,000 | 0,360 | 0,239 | 0,366 | 0,138 | 0,102 | 0,091 | 0,185 |
| Luty | 0,002 | 0,384 | 0,349 | 0,261 | 0,182 | 0,224 | 0,142 | 0,221 |
| Marzec | 0,002 | 0,386 | 0,242 | 0,326 | 0,236 | 0,198 | 0,181 | 0,224 |
| Kwiecień | 0,003 | 0,535 | 0,317 | 0,377 | 0,302 | 0,207 | 0,267 | 0,287 |
| Maj | 0,022 | 0,566 | 0,295 | 0,574 | 0,337 | 0,270 | 0,342 | 0,344 |
| Czerwiec | 0,043 | 0,789 | 0,416 | 0,809 | 0,402 | 0,260 | 0,408 | 0,447 |
| Lipiec | 0,022 | 0,679 | 0,313 | 0,681 | 0,342 | 0,394 | 0,431 | 0,409 |
| Sierpień | 0,063 | 0,990 | 0,495 | 0,918 | 0,417 | 0,274 | 0,329 | 0,498 |
| Wrzesień | 0,057 | 0,846 | 0,429 | 0,937 | 0,310 | 0,377 | 0,307 | 0,466 |
| Październik | 0,000 | 0,658 | 0,428 | 0,849 | 0,199 | 0,217 | 0,224 | 0,368 |
| Listopad | 0,000 | 0,506 | 0,350 | 0,785 | 0,055 | 0,148 | 0,237 | 0,297 |
| Grudzień | 0,000 | 0,561 | 0,368 | 0,690 | 0,108 | 0,141 | 0,217 | 0,298 |
| Minimalna średnia miesięczna | 0,000 | 0,360 | 0,239 | 0,261 | 0,055 | 0,102 | 0,091 | 0,158 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 0,063 | 0,990 | 0,495 | 0,937 | 0,417 | 0,394 | 0,431 | 0,532 |
| Średnia roczna na podstawie wartości dobowych dla 2019r. | 0,018 | 0,606 | 0,353 | 0,633 | 0,253 | 0,233 | 0,265 | 0,337 |



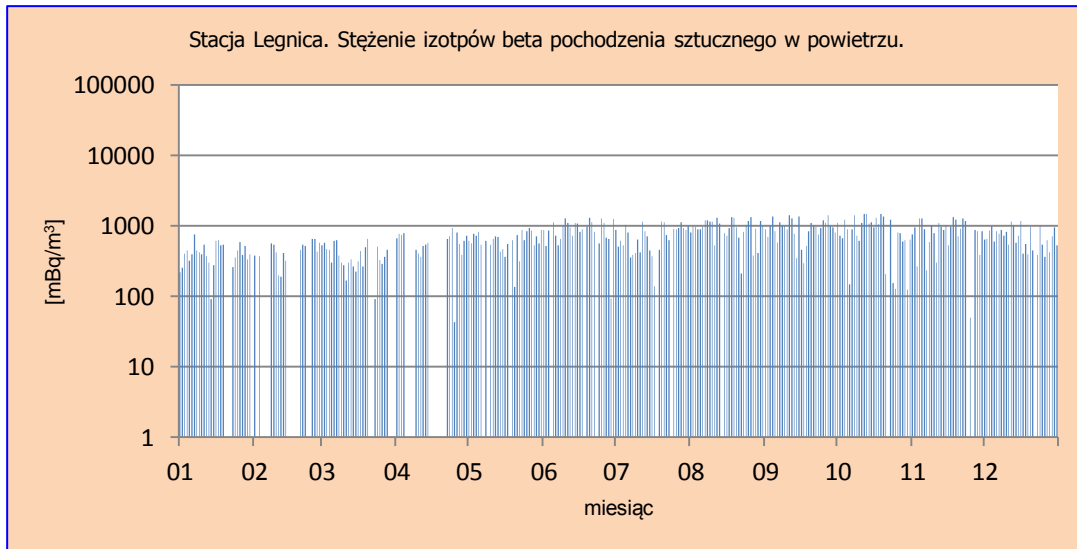
Rys.26. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Mikołajki w 2019 roku.



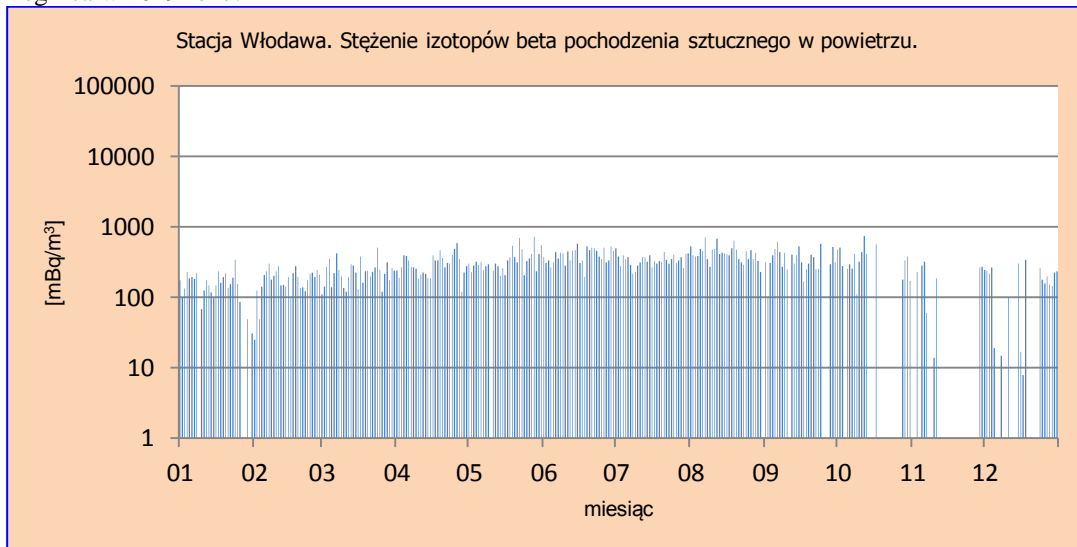
Rys.27. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp. w 2019 roku.



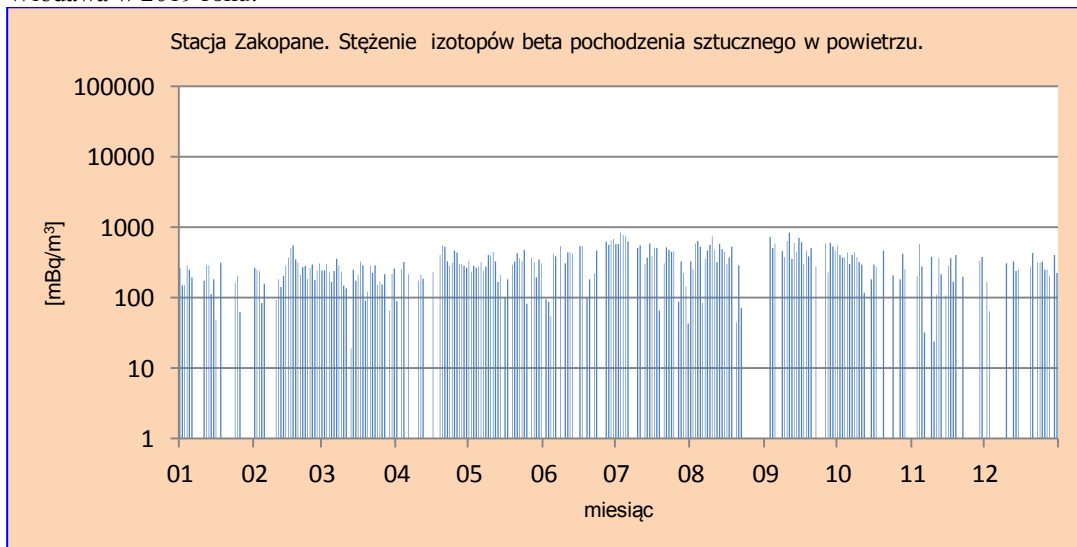
Rys.28. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Świnoujście w 2019 roku.



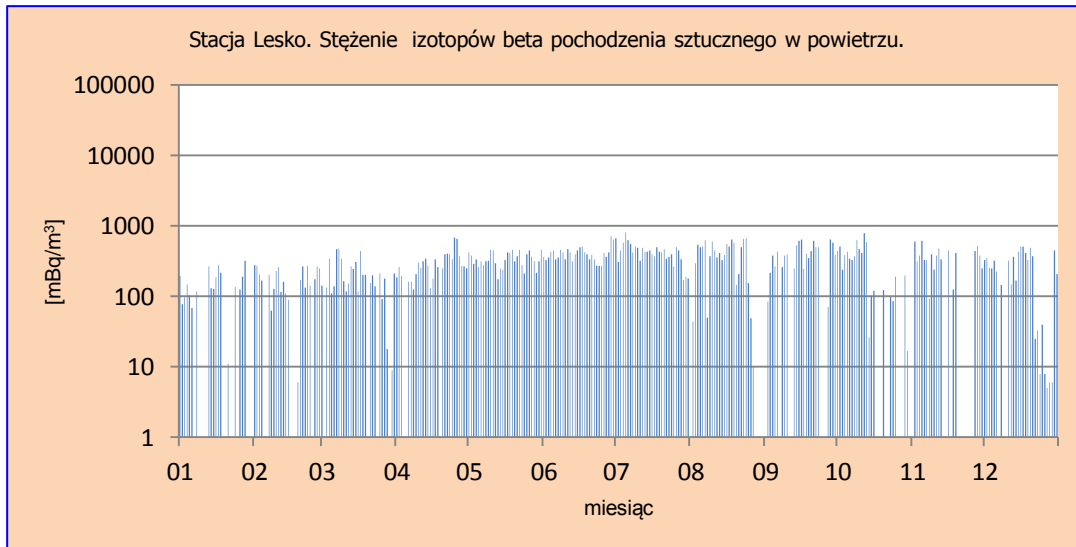
Rys.29. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Legnica w 2019 roku.



Rys.30. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Włodawa w 2019 roku.



Rys.31. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach na stacji Zakopane w 2019 roku.



Rys.32. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W 2019 roku średnie roczne stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta wyniosło $0,337 \text{ Bq m}^{-3}$ i było wyższe niż w roku ubiegłym. Wartość ta jest również najwyższa spośród odnotowanych średnich stężeń w latach 2000 – 2019. W badanym okresie najniższe średnie roczne stężenia radioaktywności przypadają na lata 2000 - 2011 ($< 0,1 \text{ Bq m}^{-3}$), znaczny wzrost następuje od 2015 roku, gdzie wartości są ponad czternastokrotnie wyższe niż minimalne średnie stężenie przypadające na rok 2001. Aktywności te można jednak uznać za niskie pozostające na poziomie tła i niestanowiące zagrożenia. Średnia aktywność badanego promieniowania w aerozolu w badanym okresie wyniosła $0,114 \text{ Bq m}^{-3}$ (Tabela 8).

Tabela 8. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta w latach 2000 – 2019, 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 | | |
| 2015 | 0,241 | | |
| 2016 | 0,240 | | |
| 2017 | 0,237 | Średnia | 0,114 |
| 2018 | 0,229 | Maksymalna | 0,337 |
| 2019 | 0,337 | 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 2019

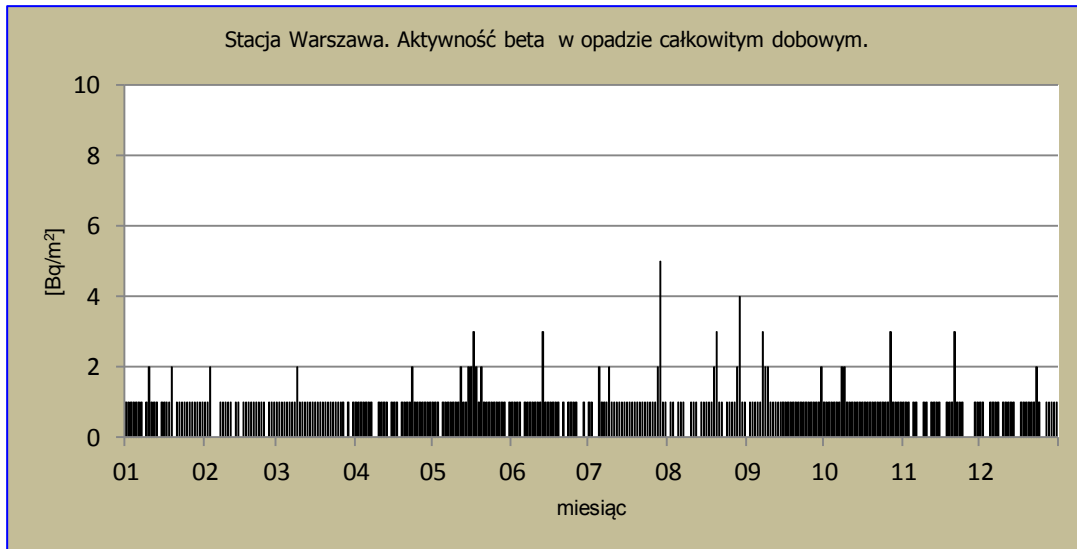
W 2019 roku maksymalne wartości dobowe zmieniały się w zakresie od 2 Bq m⁻² na stacjach Świnoujście do 7 Bq m⁻² w Mikołajkach (Tabela 9, Rys 33-41). Minimalne dobowe stężenia izotopów beta promieniotwórczych w próbkach całkowitego opadu dobowego na wszystkich stacjach pomiarowych przyjmowały wartości na poziomie zera. Średnia suma wyznaczona na podstawie wartości dobowych dla całego roku 2019 wynosiła 306,2 Bq m⁻² i była nieznacznie niższa od sumy wyznaczonej dla roku 2018 (326,2 Bq m⁻²). Miesięczne średnie aktywności beta wyznaczone na podstawie pomiarów dobowych zmieniały się w zakresie od 0,1 Bq m⁻² (Gdynia) do 1,7 Bq m⁻² dla Zakopanego. Porównując średnie wartości roczne wyznaczone na podstawie danych dobowych w 2019 roku, najmniejszy dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta wystąpił w Gdyni (0,2 Bq m⁻²) i Świnoujściu (0,5 Bq m⁻²) co mogło mieć związek z częstszymi i bardziej intensywnymi wiatrami występującymi w strefie nadmorskiej. Największy dopływ izotopów promieniotwórczych beta odnotowano w Zakopanem i Mikołajkach (1,1 Bq m⁻²) oraz w Warszawie, Legnicy i Włodawie (1,0 Bq m⁻²). Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów dla wszystkich stacji w 2019 roku (0,8 Bq m⁻²) było tylko o 0,1 Bq m⁻² niższe niż w roku ubiegłym.

Tabela 9. Średnie miesięczne stężenia izotopów beta w dobowym opadzie całkowitym w 2019 roku, Bq m⁻².

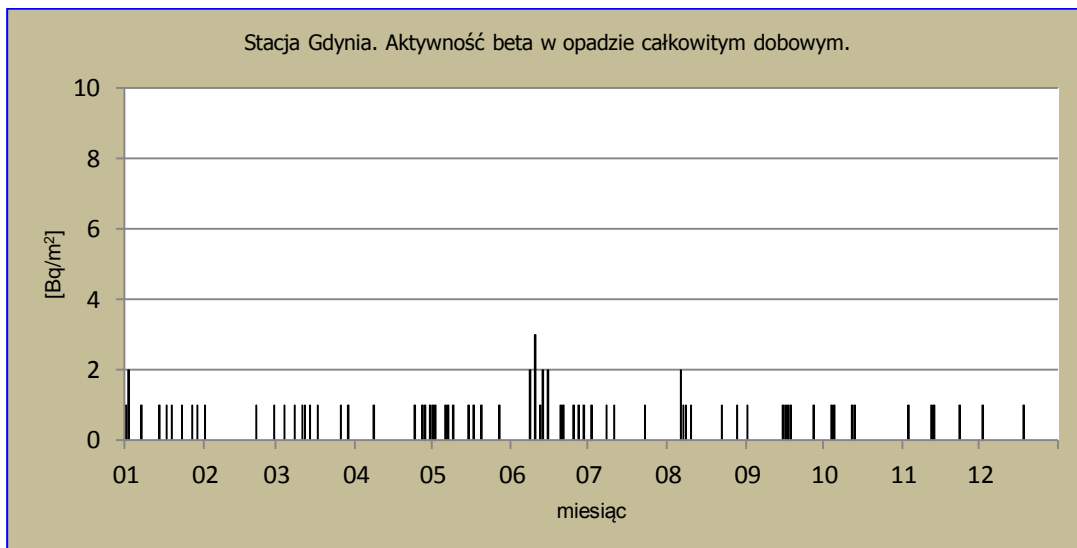
| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Poznań | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia |
|--------------------------------------|----------|--------|-----------|--------|-------------|---------|---------|----------|-------|------------|
| Styczeń | 1,0 | 0,3 | 1,1 | 0,5 | 0,5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

Tabela 9a. Roczna wartość stężenia izotopów beta uzyskana jako suma wszystkich wartości dobowych opadu całkowitego w roku 2019, Bq m⁻².

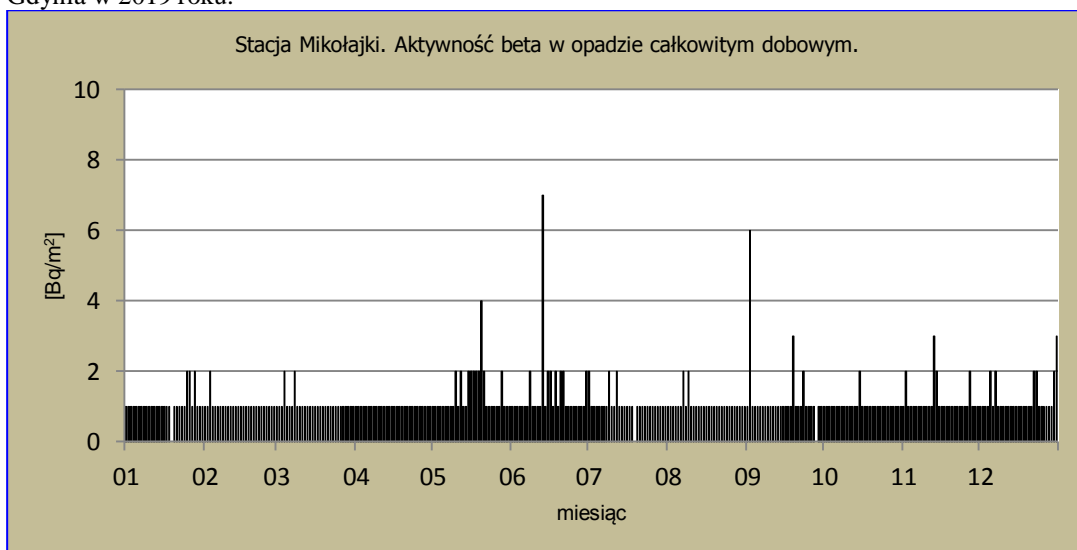
| Parametr/Stacja | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Poznań | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia suma roczna |
|-----------------|----------|--------|-----------|--------|-------------|---------|---------|----------|-------|---------------------|
| Suma roczna | 356,0 | 77,0 | 419,0 | 271,0 | 174,0 | 361,0 | 372,0 | 400,0 | 326,0 | 306,2 |



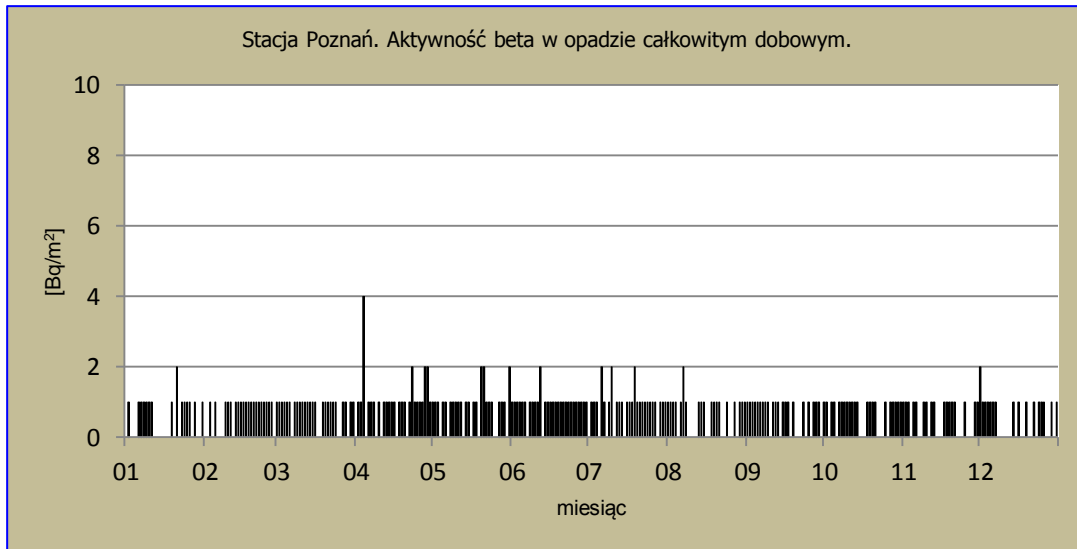
Rys.33. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Warszawa w 2019 roku.



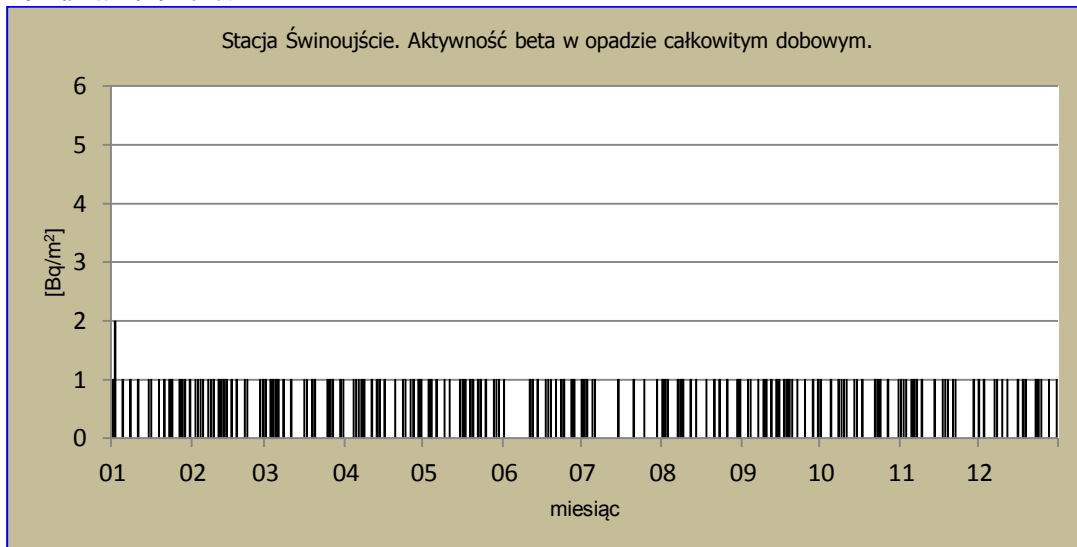
Rys.34. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Gdynia w 2019 roku.



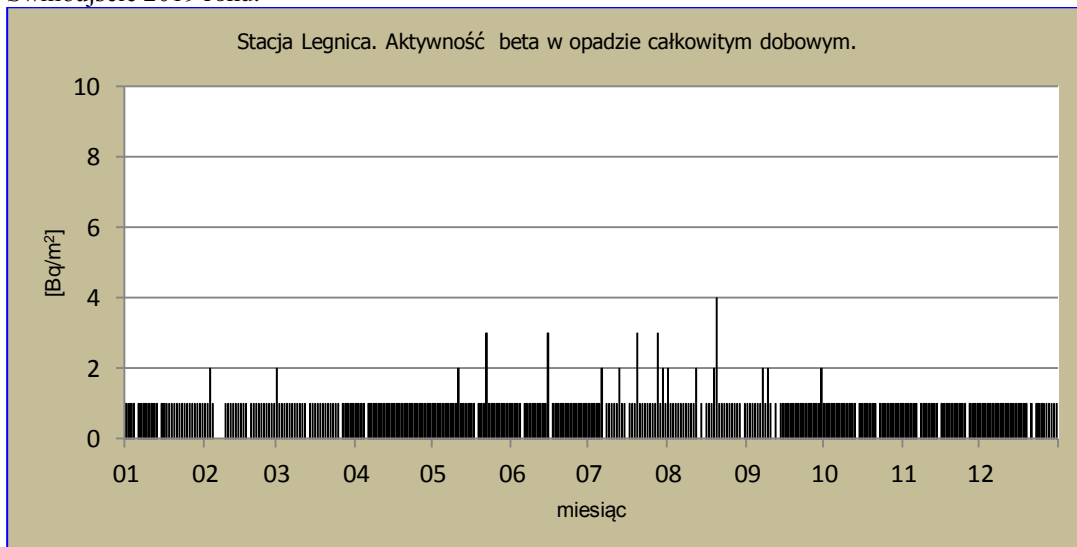
Rys.35. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Mikołajki w 2019 roku.



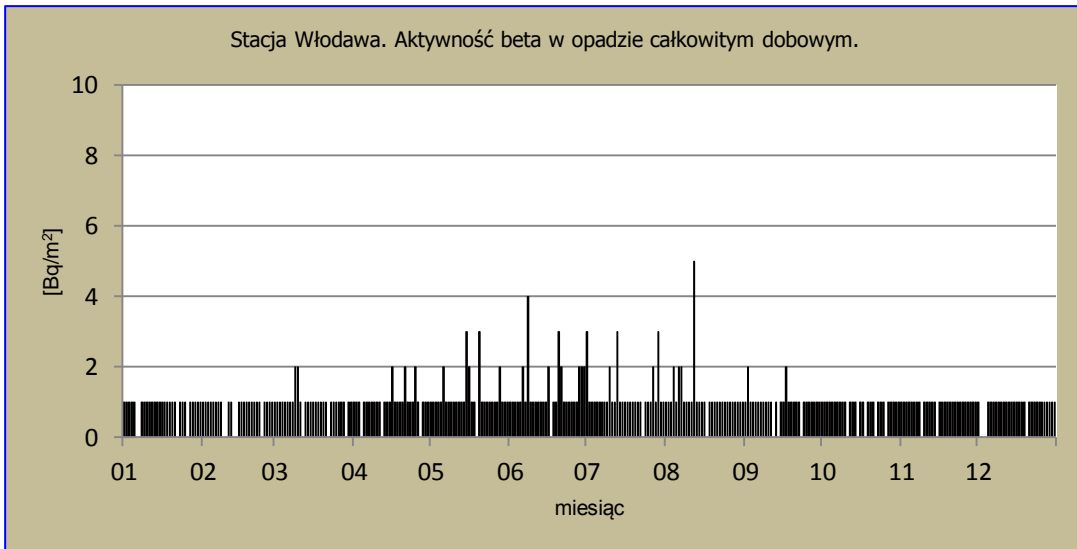
Rys.36. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Poznań w 2019 roku.



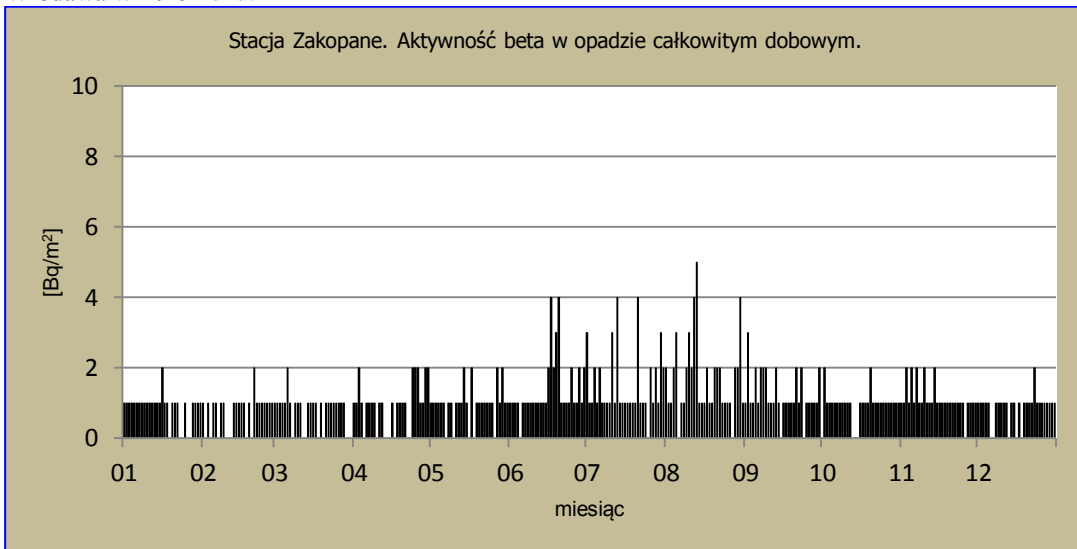
Rys.37. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Świnoujście 2019 roku.



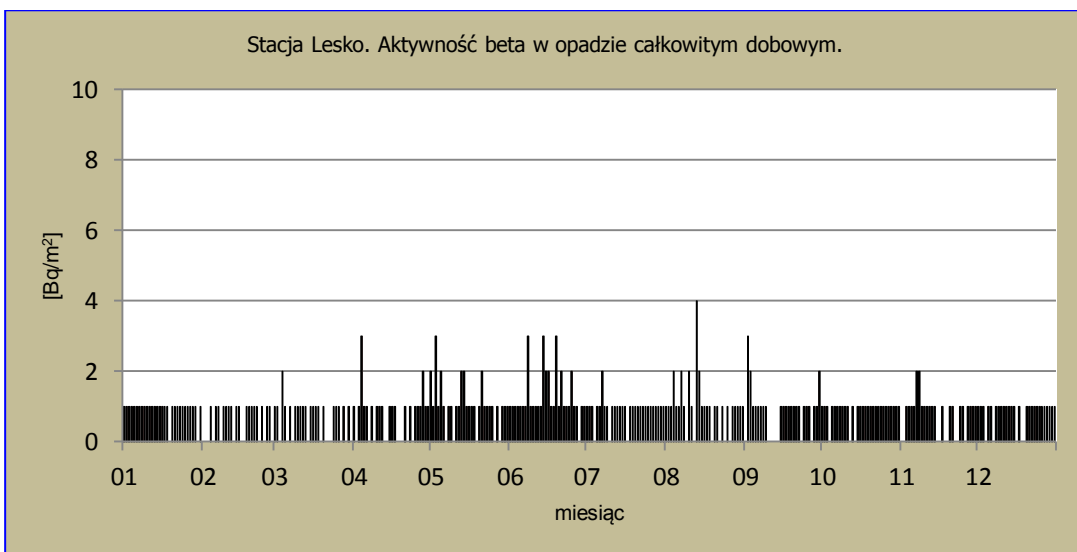
Rys.38. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Legnica w 2019 roku.



Rys.39. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Włodawa w 2019 roku.



Rys.40. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Zakopane w 2019 roku.



Rys.41. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Lesko w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W ciągu 20 lat sumaryczna aktywność beta w opadzie atmosferycznym zmieniała się w stosunkowo wąskim zakresie od 0,30 do 0,34 kBq m⁻² rok⁻¹. Aktywność beta w całkowitym opadzie dobowym dla całego obszaru Polski, obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wyznaczonych stacjach w 2019 roku (0,31 kBq m⁻² rok⁻¹), była równa wartościom w latach 2006, 2007, 2013, 2015, 2016. Wartość średnia obliczona dla okresu 2000-2019 utrzymuje się na poziomie 0,32 kBq m⁻² rok⁻¹ (Tabela 10).

Tabela 10. Średnia sumaryczna aktywność beta całkowitego opadu dobowego dla sieci 9 stacji w latach 2000 – 2019, kBq m⁻²rok⁻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 |
| 2017 | 0,33 |
| 2018 | 0,33 |
| 2019 | 0,31 |
| Średnia | 0,32 |
| Maksymalna | 0,34 |
| Minimalna | 0,30 |

3.3.2 Globalna aktywność beta wody opadowej

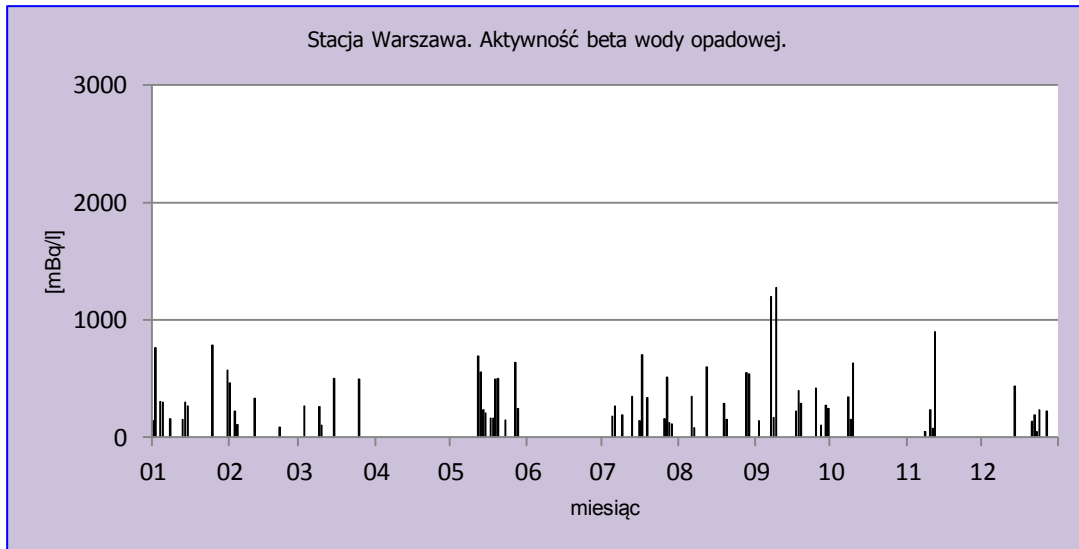
Globalną aktywność beta wody opadowej określa się jako aktywność izotopów emitujących promieniowanie beta w całkowitym opadzie dobowym w odniesieniu do objętości wody opadowej. Globalna aktywność beta wody opadowej obliczana jest na podstawie aktywności beta dobowych próbek opadu całkowitego tylko wtedy,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

Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

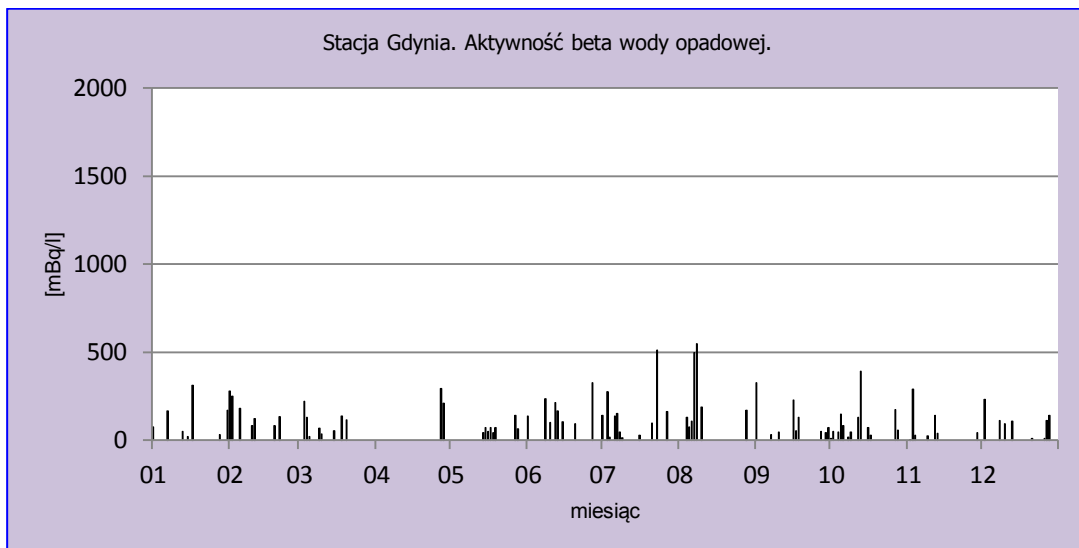
W 2019 roku maksymalna wartość dobowej aktywności beta wody opadowej wahała się w przedziale od 549 mBq l⁻¹ (Gdynia) do 1508 mBq l⁻¹ (Mikołajki) (Tabela 11, Rys. 42-50). Minimalne dobowe wartości zmieniły się w zakresie od 1 mBq l⁻¹ w Świnoujściu do 69 mBq l⁻¹ w Legnicy. Średnia roczna aktywność beta wody opadowej wahała się od 128,3 mBq l⁻¹ w Gdyni do 436,6 mBq l⁻¹ w Mikołajkach. Średnia miesięczna aktywność wody opadowej ze wszystkich stacji była najwyższa w lipcu 368 mBq l⁻¹ a najniższa w maju – 253 mBq l⁻¹.

Tabela 11. Średnie miesięczne wartości aktywności beta wody opadowej w 2019 roku, mBq l⁻¹.

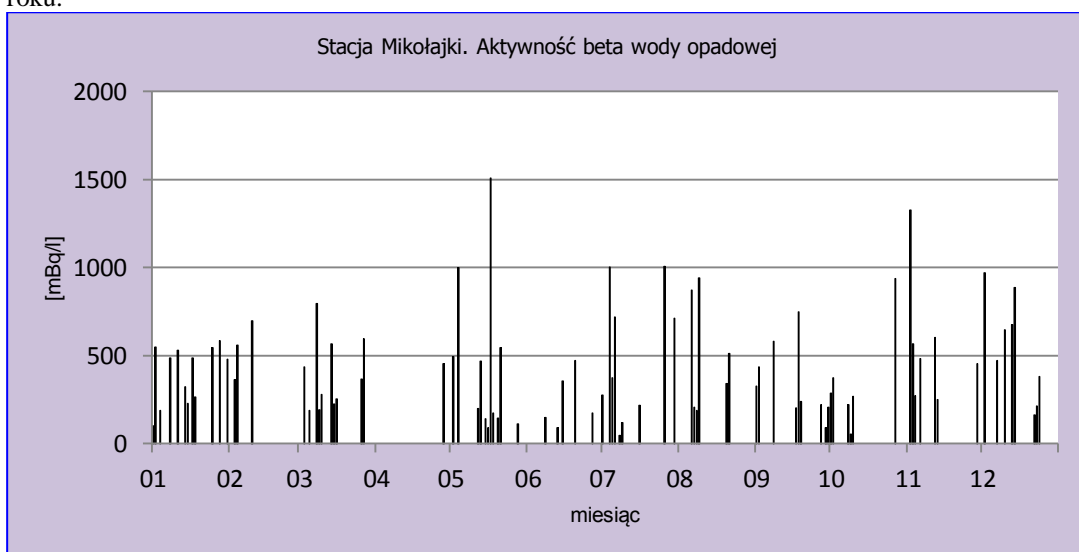
| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Poznań | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Srednia |
|--------------------------------------|----------|--------|-----------|--------|-------------|---------|---------|----------|-------|------------|
| Styczeń | 374,6 | 117,9 | 397,7 | 216,3 | 209,8 | 346,9 | 431,7 | 249,7 | 300,8 | 294 |
| Luty | 243,6 | 163,0 | 540,3 | 366,7 | 181,1 | 211,3 | 237,7 | 154,3 | 373,8 | 275 |
| Marzec | 326,4 | 97,9 | 390,9 | 282,4 | 253,9 | 280,8 | 411,9 | 283,5 | 482,7 | 312 |
| Kwiecień | | 253,5 | 455,0 | 460,5 | 193,0 | 166,0 | 349,0 | 258,8 | 140,0 | 284 |
| Maj | 367,7 | 70,1 | 443,4 | 188,2 | 205,6 | 248,3 | 285,7 | 202,3 | 266,8 | 253 |
| Czerwiec | | 173,5 | 248,6 | 667,8 | 151,0 | 462,0 | 387,2 | 301,7 | 371,6 | 345 |
| Lipiec | 280,2 | 145,3 | 497,6 | 380,4 | 153,7 | 638,3 | 490,0 | 436,4 | 294,7 | 368 |
| Sierpień | 366,1 | 246,1 | 510,3 | 270,3 | 232,9 | 339,0 | 416,0 | 371,4 | 421,0 | 353 |
| Wrzesień | 431,0 | 110,3 | 339,6 | 215,3 | 96,0 | 266,5 | 318,4 | 339,7 | 387,8 | 278 |
| Październik | 376,0 | 97,9 | 357,2 | 321,7 | 145,5 | 279,7 | 234,8 | 404,4 | 269,3 | 276 |
| Listopad | 315,3 | 81,9 | 565,6 | 199,0 | 212,7 | 352,3 | 282,3 | 185,2 | 231,3 | 269 |
| Grudzień | 211,5 | 102,6 | 551,5 | 236,0 | 128,8 | 517,6 | 375,1 | 259,6 | 431,5 | 313 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 431,0 | 253,5 | 565,6 | 667,8 | 253,9 | 638,3 | 490,0 | 436,4 | 482,7 | 469 |
| Minimalna średnia miesięczna | 211,5 | 70,1 | 248,6 | 188,2 | 96,0 | 166,0 | 234,8 | 154,3 | 140,0 | 168 |
| Maksymalna wartość dobową | 1275 | 549 | 1508 | 960 | 862 | 1358 | 1299 | 1194 | 1127 | 1126 |
| Minimalna wartość dobową | 50 | 4 | 46 | 53 | 1 | 69 | 59 | 19 | 36 | 37 |
| Średnia roczna | 338,2 | 128,3 | 436,6 | 280,2 | 183,8 | 340,9 | 362,6 | 285,9 | 328,2 | 298 |



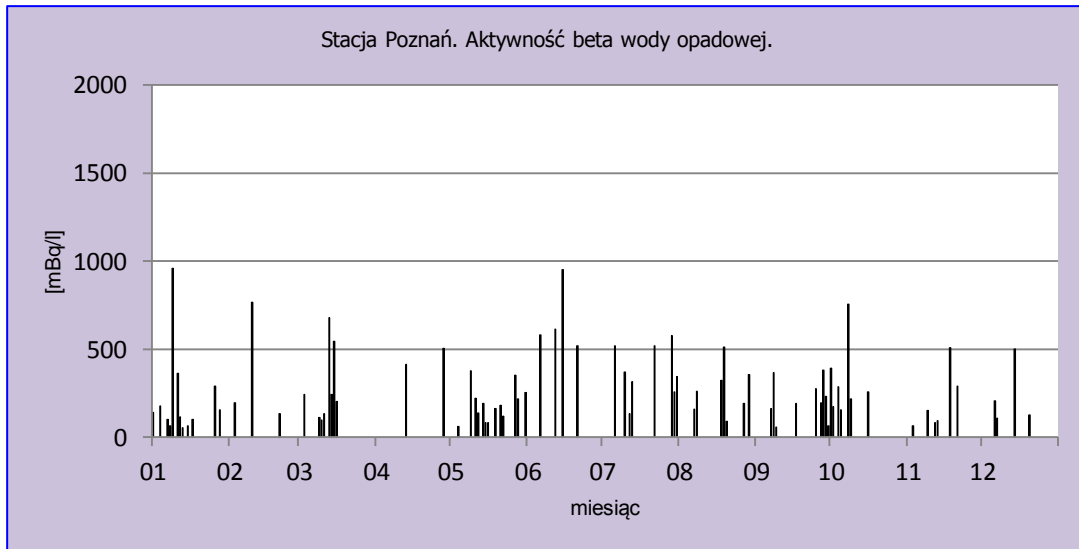
Rys.42. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Warszawa w 2019 roku.



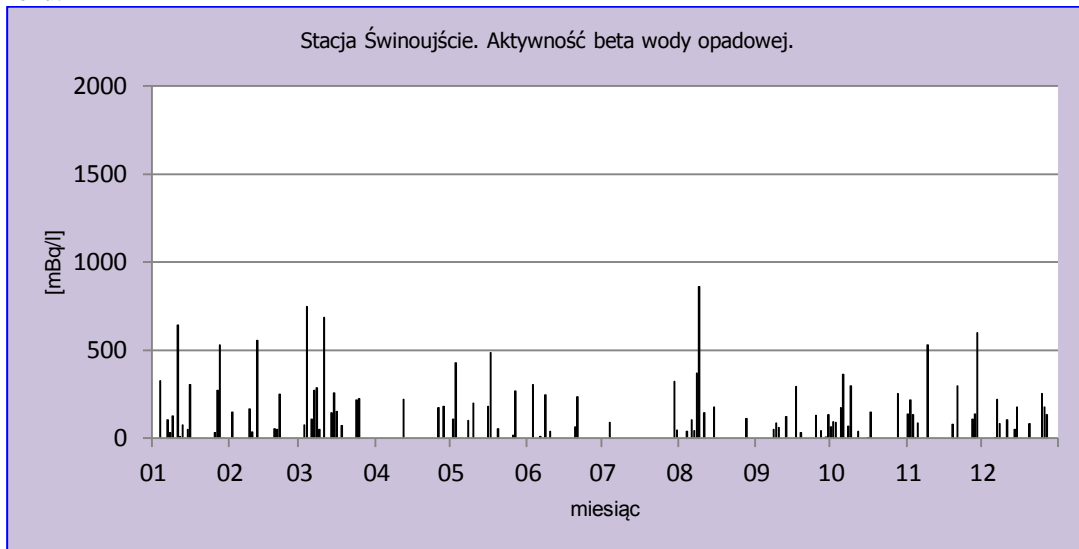
Rys.43. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Gdynia w 2019 roku.



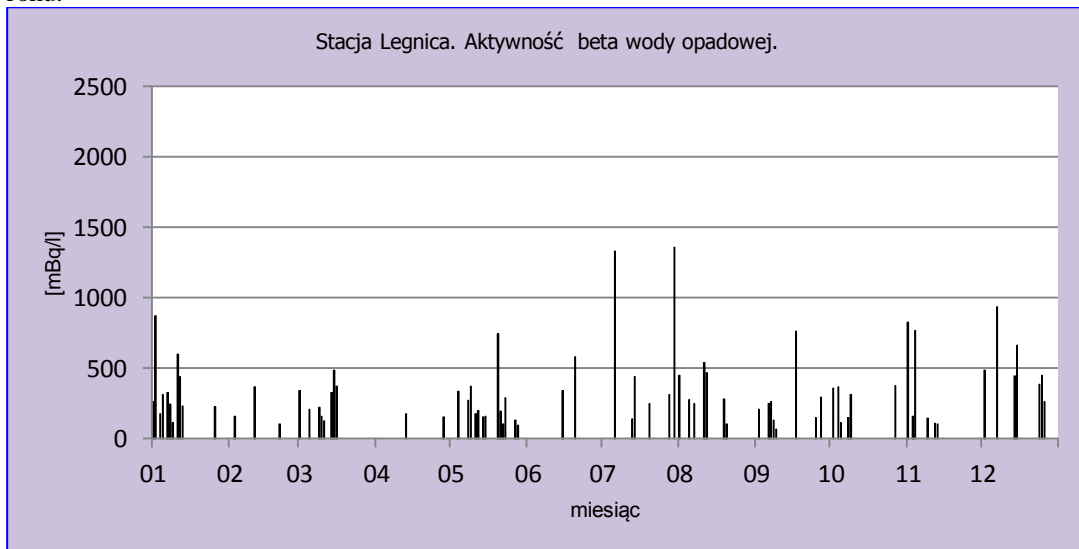
Rys.44. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Mikołajki w 2019 roku.



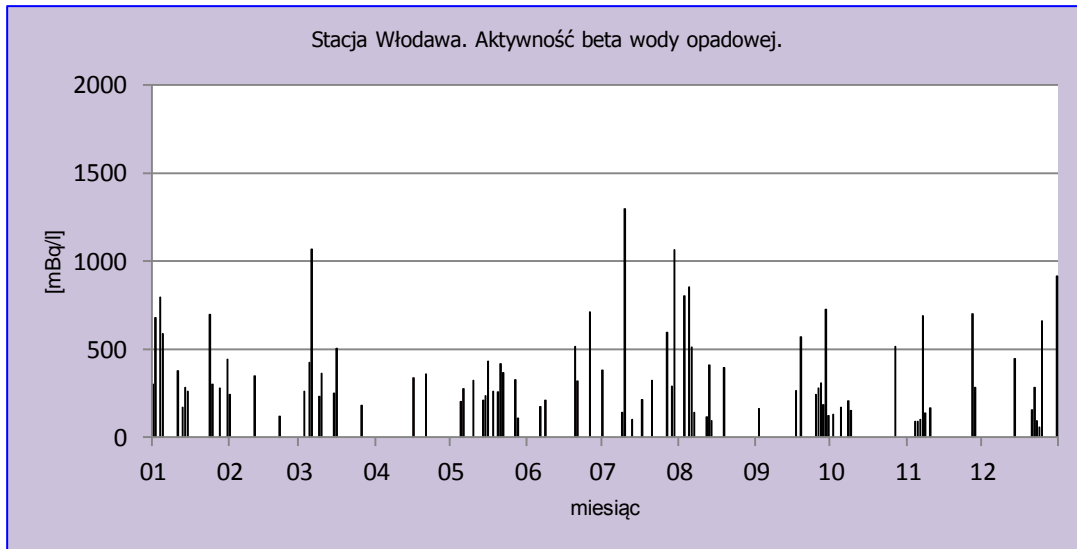
Rys.45. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Poznań w 2019 roku.



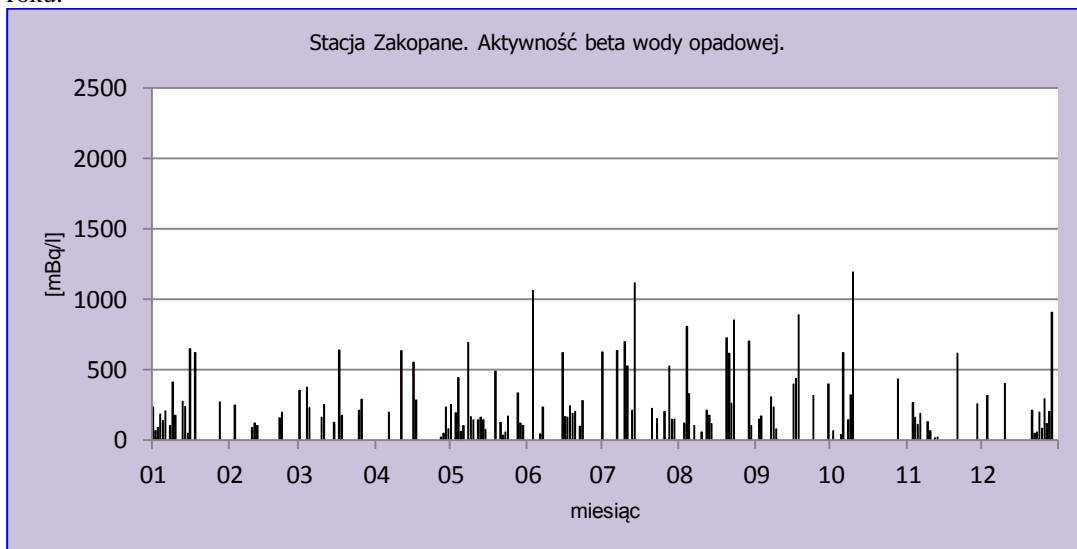
Rys.46. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Świnoujście w 2019 roku.



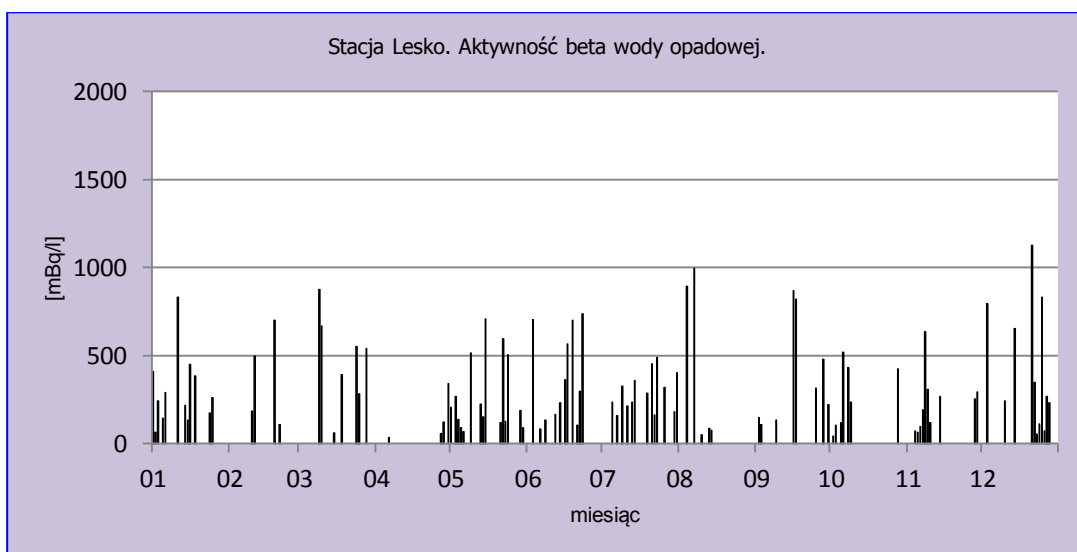
Rys.47. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Legnica w 2019 roku.



Rys.48. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Włodawa w 2019 roku.



Rys.49. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Zakopane w 2019 roku.



Rys.50. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Lesko w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Średnia aktywność beta wody opadowej w 2019 roku wyniosła 298 mBq l⁻¹ i była niższa niż w ubiegłym roku (Tabela 12). Wartość ta jest najniższą odnotowaną w okresie od 2000 do 2019 roku. Maksymalna aktywność w badanych latach przypada na rok 2003 i wynosi 376 mBq l⁻¹, Średnia aktywność beta wody opadowej w omawianym okresie wynosi 341 mBq l⁻¹.

Tabela 12. Średnie aktywności beta wody opadowej w latach 2000 – 2019, 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 |
| 2017 | 316 |
| 2018 | 335 |
| 2019 | 298 |
| Średnia | 341 |
| Minimalna | 298 |
| Maksymalna | 376 |

3.3.3 Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego

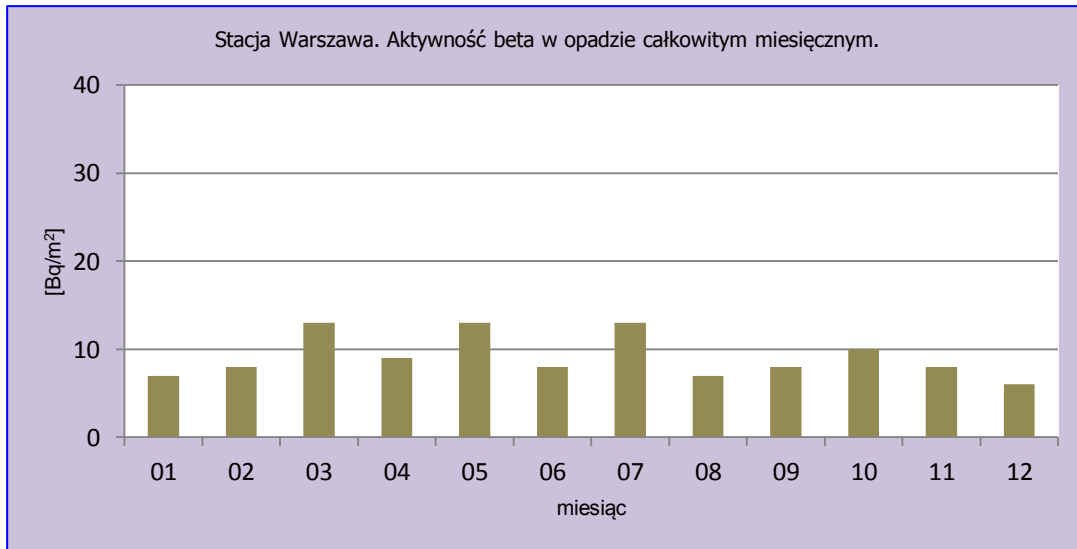
Całkowita aktywność promieniowania beta w opadzie miesięcznym związana jest, podobnie jak ma to miejsce w przypadku całkowitej aktywności opadu dobowego, z obecnością izotopów emitujących promieniowanie beta w próbkach opadu zbieranych w reżimie miesięcznym.

Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

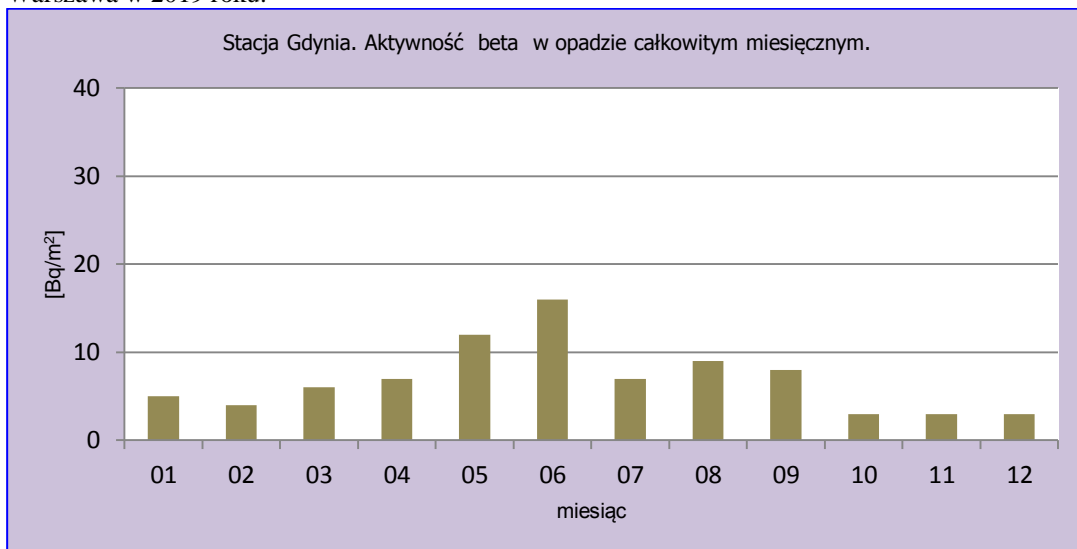
W 2019 roku aktywności promieniowania beta w miesięcznym opadzie atmosferycznym oscylowały w szerokim zakresie od 1 Bq m⁻² do 18 Bq m⁻² (Tabela 13). Maksymalną wartość w skali roku zarejestrowano w lipcu na stacji Zakopane (18 Bq m⁻²) oraz w czerwcu w Gdyni (16 Bq m⁻²). Minimalną wartość na poziomie 1 Bq m⁻² odnotowano w grudniu na stacji w Świnoujście, a także w Legnicy (listopad) i Włodawie (luty) - 2 Bq m⁻². Podobnie jak w roku poprzednim najniższe aktywności beta notowane były w okresie zimowym (grudzień, luty), a najwyższe w okresie wiosenno-letnim (marzec – sierpień). Średnia roczna aktywność promieniowania beta w Polsce w próbkach opadu całkowitego wynosiła 7,4 Bq m⁻² i była o 1,0 Bq m⁻² niższa niż w roku ubiegłym (8,4 Bq m⁻²). Najniższe średnie roczne aktywności beta obliczone na podstawie danych dla zbiorczych próbek miesięcznego opadu całkowitego w 2019 roku zarejestrowano na stacjach w Świnoujściu (4,1 Bq m⁻²) oraz w Legnicy (5,1 Bq m⁻²) i były one odpowiednio o 45% i 31% niższe od średniej dla obszaru całej Polski (Rys. 51-59). Na pozostałych stacjach średnia aktywność promieniowania beta zmieniała się w zakresie od 6,9 Bq m⁻² (Gdynia) do 10,3 Bq m⁻² w Zakopanem.

Tabela 13. Zestawienie wyników aktywności beta zbiorczych próbek miesięcznego opadu całkowitego w roku 2019, w Bq m⁻².

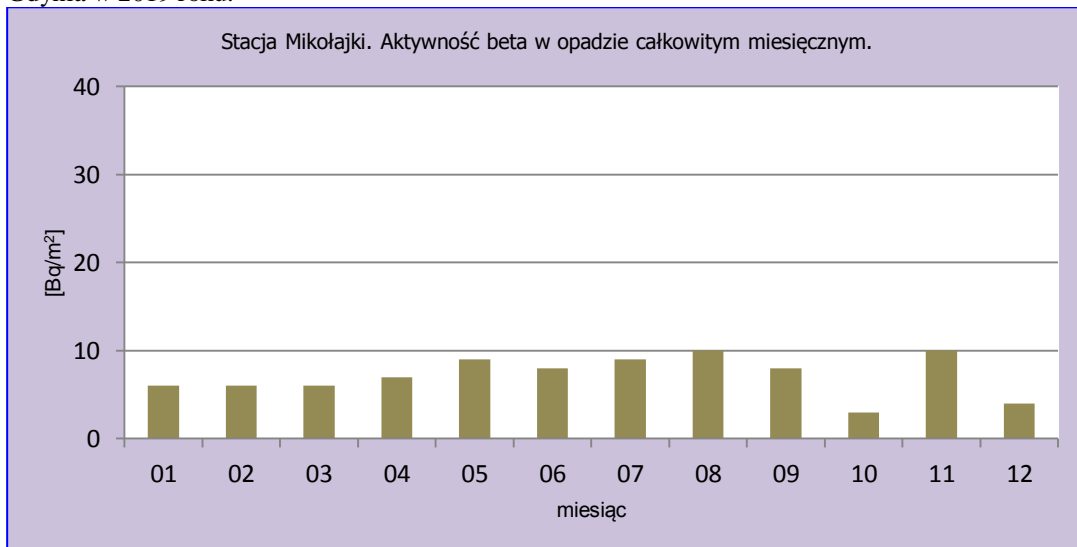
| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Poznań | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko |
|------------------|------------|--------|-----------|--------|-------------|---------|---------|----------|-------|
| Styczeń | 7 | 5 | 6 | 6 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| Luty | 8 | 4 | 6 | 4 | 2 | 4 | 2 | 10 | 5 |
| Marzec | 13 | 6 | 6 | 7 | 2 | 3 | 4 | 6 | 11 |
| Kwiecień | 9 | 7 | 7 | 9 | 2 | 4 | 9 | 8 | 7 |
| Maj | 13 | 12 | 9 | 13 | 6 | 7 | 10 | 12 | 7 |
| Czerwiec | 8 | 16 | 8 | 9 | 7 | 6 | 11 | 12 | 11 |
| Lipiec | 13 | 7 | 9 | 9 | 5 | 10 | 14 | 18 | 9 |
| Sierpień | 7 | 9 | 10 | 10 | 6 | 8 | 14 | 17 | 14 |
| Wrzesień | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 6 | 7 | 9 | 14 |
| Październik | 10 | 3 | 3 | 11 | 5 | 4 | 4 | 9 | 7 |
| Listopad | 8 | 3 | 10 | 7 | 2 | 2 | 4 | 8 | 7 |
| Grudzień | 6 | 3 | 4 | 4 | 1 | 3 | 4 | 9 | 4 |
| Średnia | 9,2 | 6,9 | 7,2 | 8,2 | 4,1 | 5,1 | 7,3 | 10,3 | 8,5 |
| Maksymalna | 13 | 16 | 10 | 13 | 8 | 10 | 14 | 18 | 14 |
| Minimalna | 6 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 5 | 4 |
| Średnia roczna | 7,4 | | | | | | | | |
| Maks. miesięczna | 18,0 | | | | | | | | |
| Min. miesięczna | 1,0 | | | | | | | | |



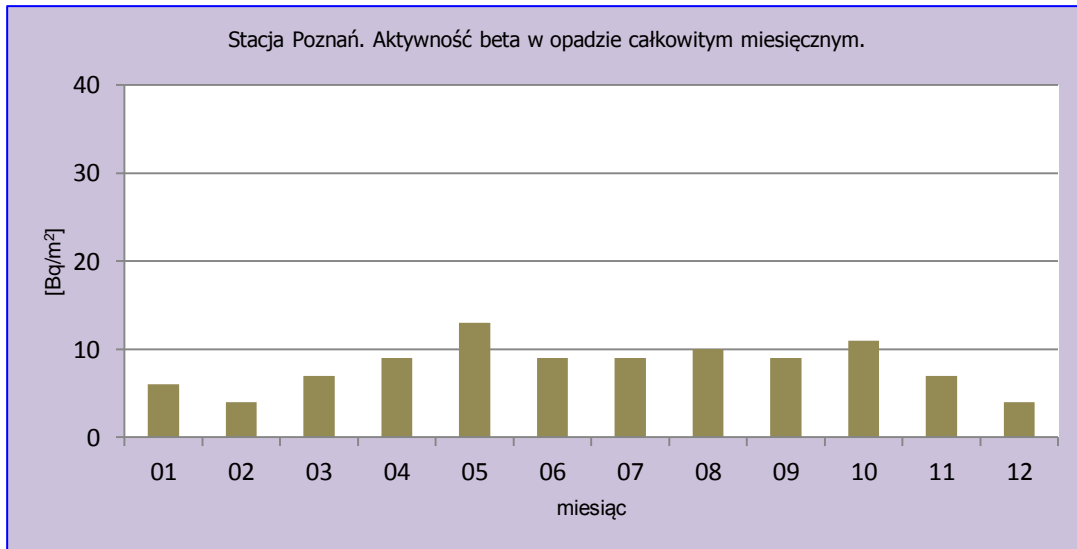
Rys.51. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Warszawa w 2019 roku.



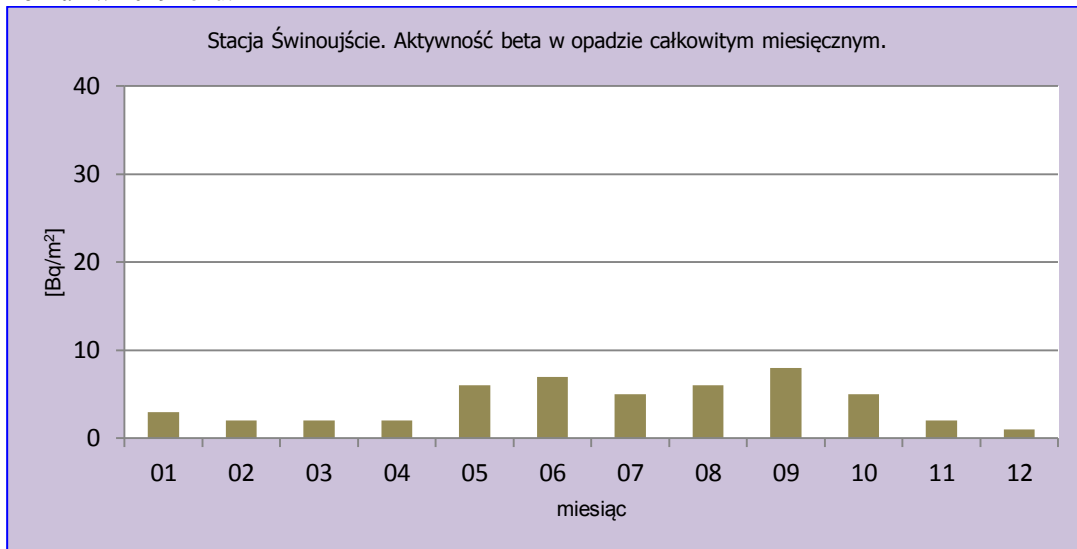
Rys.52. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Gdynia w 2019 roku.



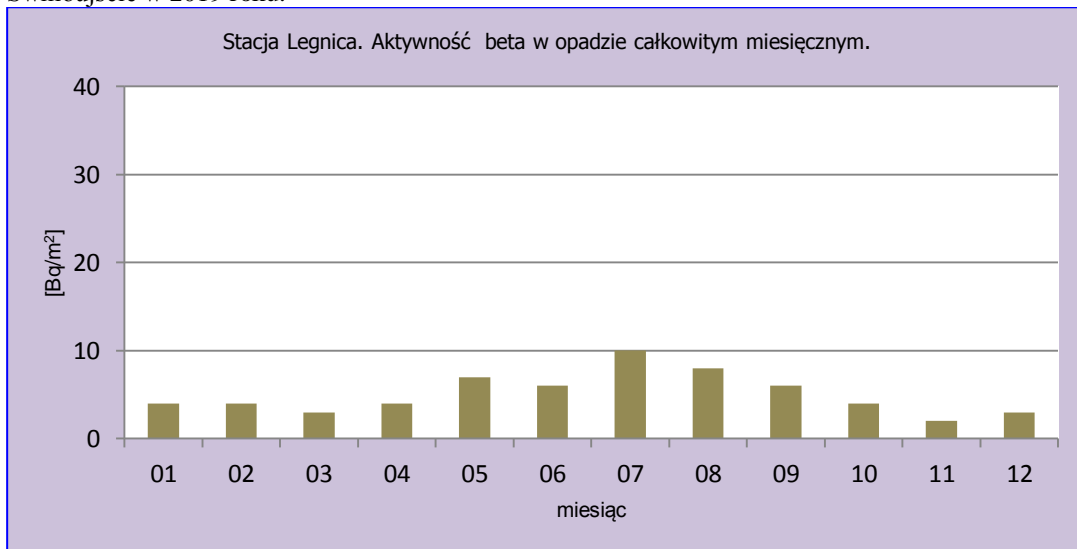
Rys.53. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Mikołajki w 2019 roku.



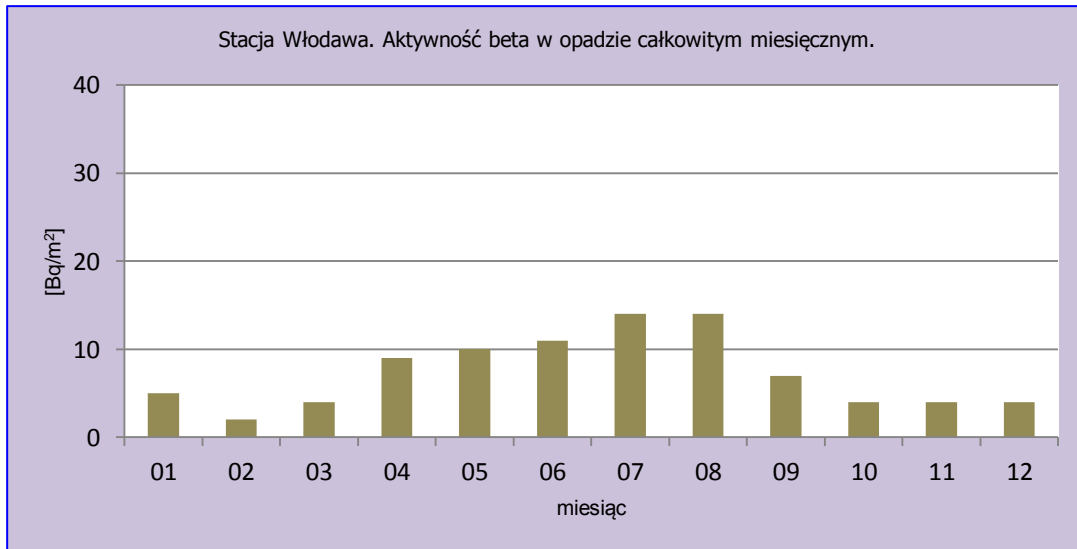
Rys.54. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Poznań w 2019 roku.



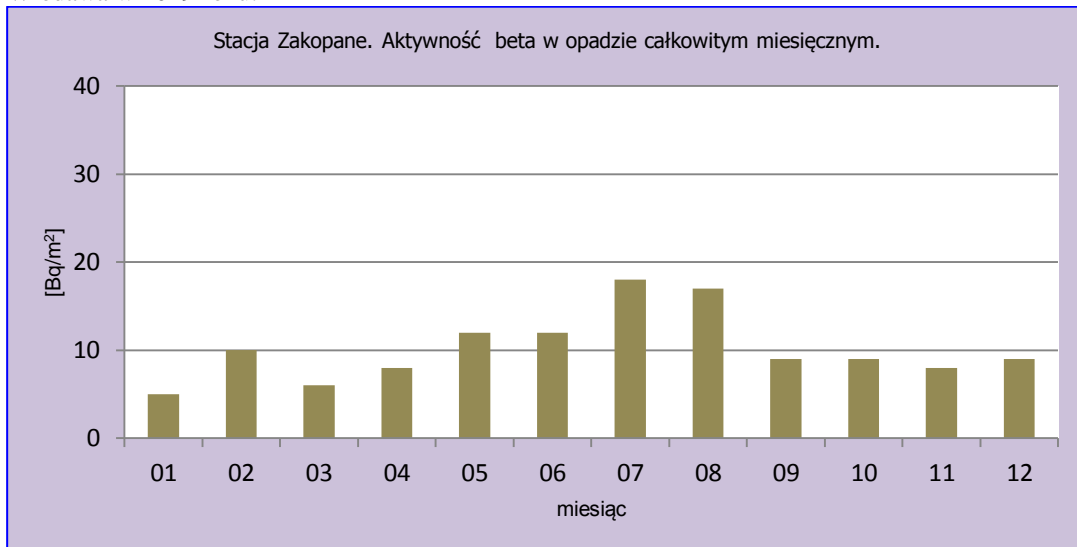
Rys.55. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Świnoujście w 2019 roku.



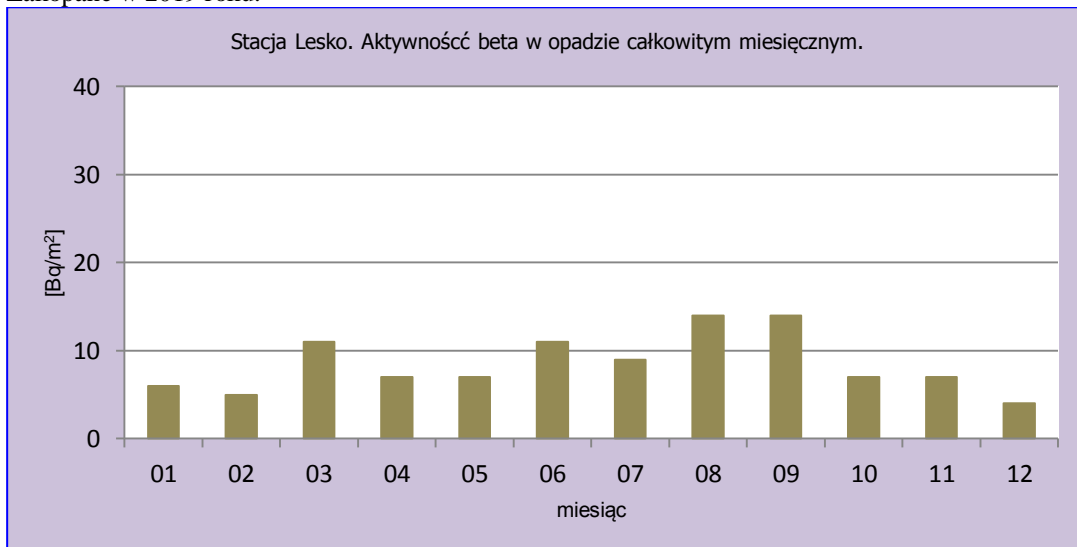
Rys.56. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Legnica w 2019 roku.



Rys.57. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Włodawa w 2019 roku.



Rys.58. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Zakopane w 2019 roku.



Rys.59. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Lesko w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

W 2019 roku średnia aktywność promieniowania beta w całkowitym opadzie miesięcznym wynosiła $7,4 \text{ Bq m}^{-2}$ i była niższa niż w roku ubiegłym – $8,4 \text{ Bq m}^{-2}$. W omawianym okresie średnia aktywność promieniowania beta wahała się w przedziale od 6 Bq m^{-2} (2005) do $8,7 \text{ Bq m}^{-2}$ (2017), a średnia aktywność całkowitego opadu atmosferycznego w latach 2000 - 2019 wynosi $7,2 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 14).

Tabela 14. Średnie wartości aktywności beta całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000 – 2019, 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 |
| 2017 | 8,7 |
| 2018 | 8,4 |
| 2019 | 7,4 |
| Średnia | 7,2 |
| Minimalna | 6,0 |
| Maksymalna | 8,7 |

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

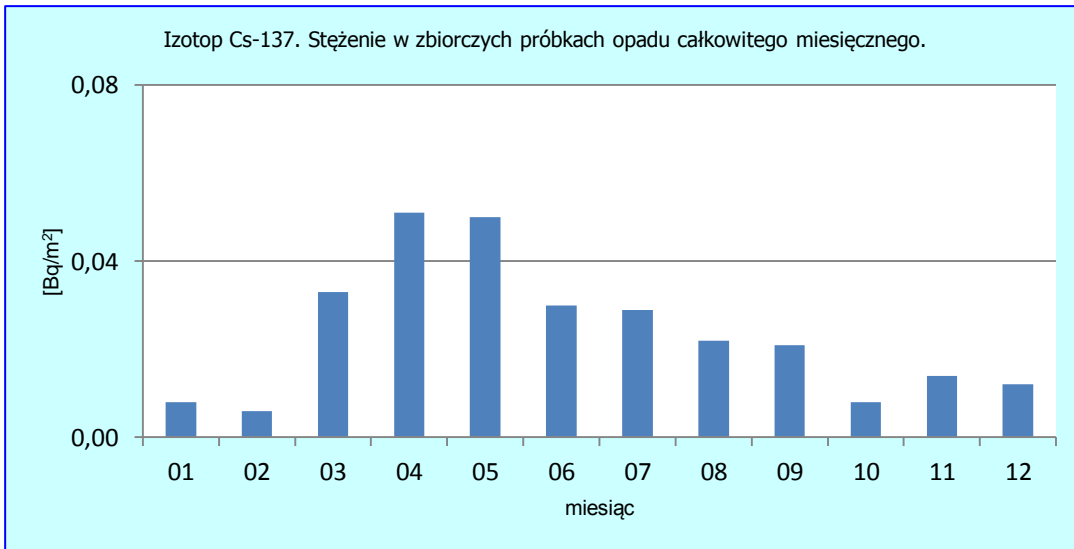
Promieniotwórcze izotopy cezu są izotopami pochodzenia antropogenicznego o stosunkowo długim okresie połowicznego rozpadu (30,05 lat) w przypadku ^{137}Cs i zdecydowanie krótszym (2,07 lat) w przypadku ^{134}Cs . Ich stężenia promieniotwórcze (aktywność odniesiona do powierzchni) oznaczane są w zbiorczych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

Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

W 2019 roku średnie stężenie ^{137}Cs w opadzie atmosferycznym wynosiło $0,024 \text{ Bq m}^{-2}$, natomiast stężenia ^{134}Cs były poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej. Najniższe aktywności promieniotwórcze ^{137}Cs odnotowano w miesiącach: luty ($0,006 \text{ Bq m}^{-2}$) oraz styczeń ($0,008 \text{ Bq m}^{-2}$), natomiast najwyższe wystąpiły w kwietniu ($0,051 \text{ Bq m}^{-2}$) i maju ($0,050 \text{ Bq m}^{-2}$), i były prawie 9 razy wyższe od wartości minimalnych. Taki rozkład stężeń w roku był związany z intensywnymi opadami oraz łatwiejszym wyłukiwaniem izotopów z atmosfery. (Tabela 15, Rys. 60).

Tabela 15. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{134}Cs w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2019 r., Bq m^{-2} . Dane z roku 2019.

| | Aktywność Bq m^{-2} | Aktywność Bq m^{-2} |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Miesiąc | Cs-137 | Cs-134 |
| Styczeń | $0,008 \pm 0,001$ | $< 0,004$ |
| Luty | $0,006 \pm 0,001$ | $< 0,003$ |
| Marzec | $0,033 \pm 0,002$ | $< 0,005$ |
| Kwiecień | $0,051 \pm 0,003$ | $< 0,004$ |
| Maj | $0,050 \pm 0,003$ | $< 0,004$ |
| Czerwiec | $0,030 \pm 0,002$ | $< 0,004$ |
| Lipiec | $0,029 \pm 0,002$ | $< 0,004$ |
| Sierpień | $0,022 \pm 0,002$ | $< 0,004$ |
| Wrzesień | $0,021 \pm 0,002$ | $< 0,004$ |
| Październik | $0,008 \pm 0,003$ | $< 0,004$ |
| Listopad | $0,014 \pm 0,004$ | $< 0,004$ |
| Grudzień | $0,012 \pm 0,003$ | $< 0,003$ |
| Suma roczna | 0,284 | |
| Średnia | 0,024 | |
| Maksymalna | 0,051 | |
| Minimalna | 0,006 | |

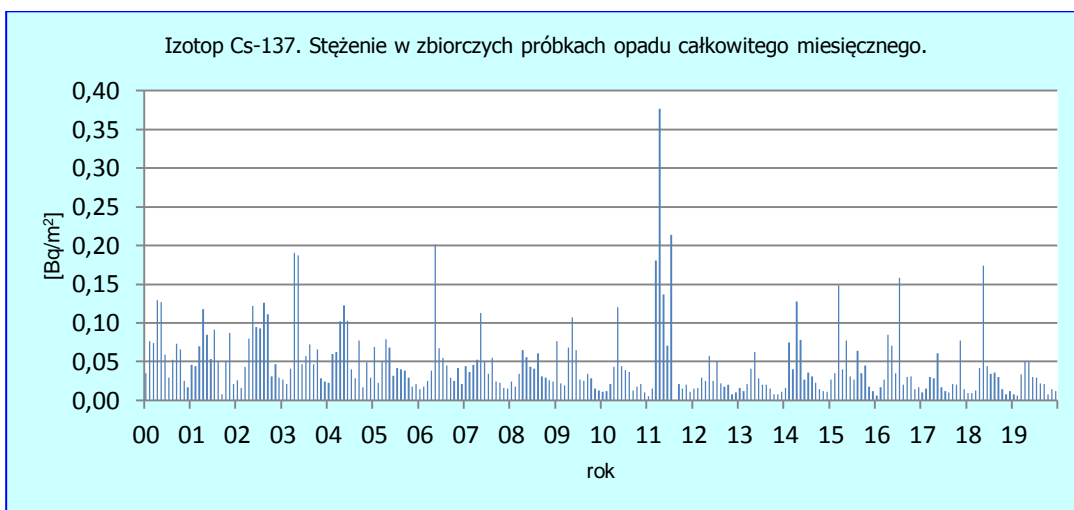


Rys.60. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w roku 2019.

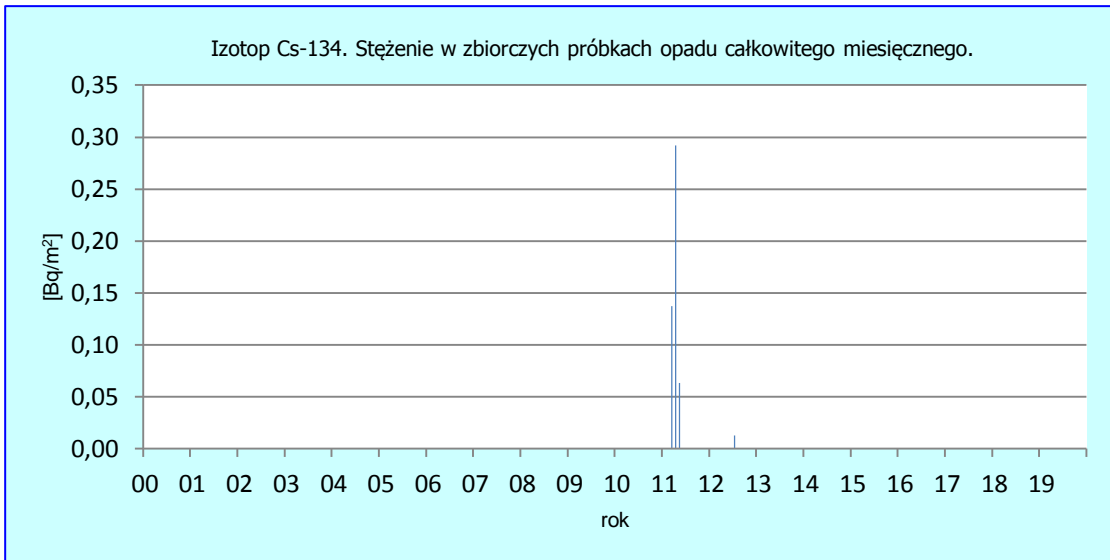
Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

Izotop ^{137}Cs charakteryzuje się niską prędkością suchej depozycji ($0,05 - 0,5 \text{ cm s}^{-1}$), dlatego ładunek tego izotopu docierający do powierzchni ziemi wzrasta w okresach intensywnych opadów, które powodują wyplukiwanie tego pierwiastka z atmosfery. W związku z tym najczęściej największy dopływ ^{137}Cs do powierzchni ziemi występuje w okresie wiosenno-letnim, kiedy miesięczne sumy opadów są największe (Rys. 61). Roczna suma dopływu ^{137}Cs w 2019 roku wynosiła $0,284 \text{ Bq m}^{-2}$ i była o $0,141$ niższa od wartości w 2017 ($0,425 \text{ Bq m}^{-2}$), a jednocześnie około 3,5 razy mniejsza od wartości uzyskanej 2011 ($1,067 \text{ Bq m}^{-2}$), kiedy odnotowano podwyższoną depozycję na skutek awarii elektrowni atomowej w Fukushima (Tabela 16, Rys. 63). Minimalny sumaryczny dopływ ^{137}Cs przypadał na rok 2013 ($0,262 \text{ Bq m}^{-2}$). W okresie 2000 – 2019 średnia suma rocznych dopływów ^{137}Cs wynosił $0,549 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 16).

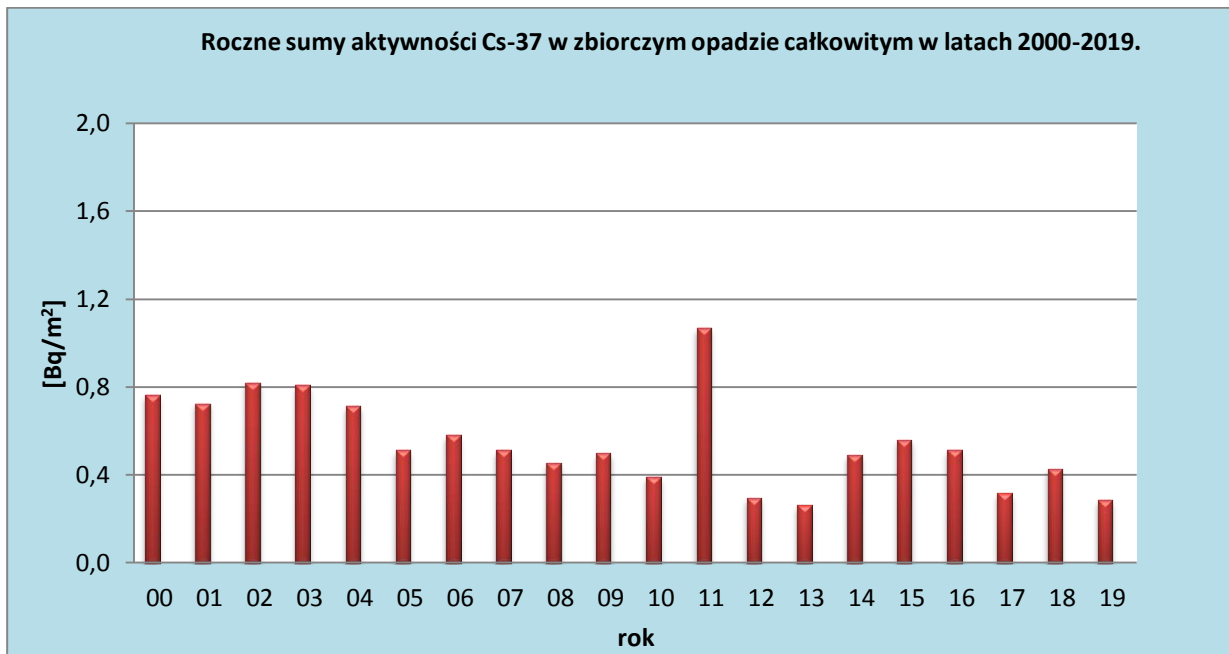
W przypadku izotopu ^{134}Cs tylko w roku 2011 i 2012 określono jego dopływ, w pozostałych latach stężenia nie przekraczały limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej (Rys. 62). W omawianych pomiarach od roku 2000 oprócz incydentu w Fukushima nie zanotowano obecności ^{134}Cs w powietrzu.



Rys.61. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2019.



Rys.62. Stężenie promieniotwórcze ¹³⁴Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2019.



Rys.63. Roczne sumy dopływu ¹³⁷Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2019.

Tabela 16. Roczna suma dopływu ^{137}Cs i ^{134}Cs w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2019, 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 | 0,013 |
| 2013 | 0,262 | |
| 2014 | 0,491 | |
| 2015 | 0,559 | |
| 2016 | 0,511 | |
| 2017 | 0,315 | |
| 2018 | 0,425 | |
| 2019 | 0,284 | |
| Średnia | 0,549 | |
| Minimalna | 0,262 | |
| Maksymalna | 1,067 | |

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

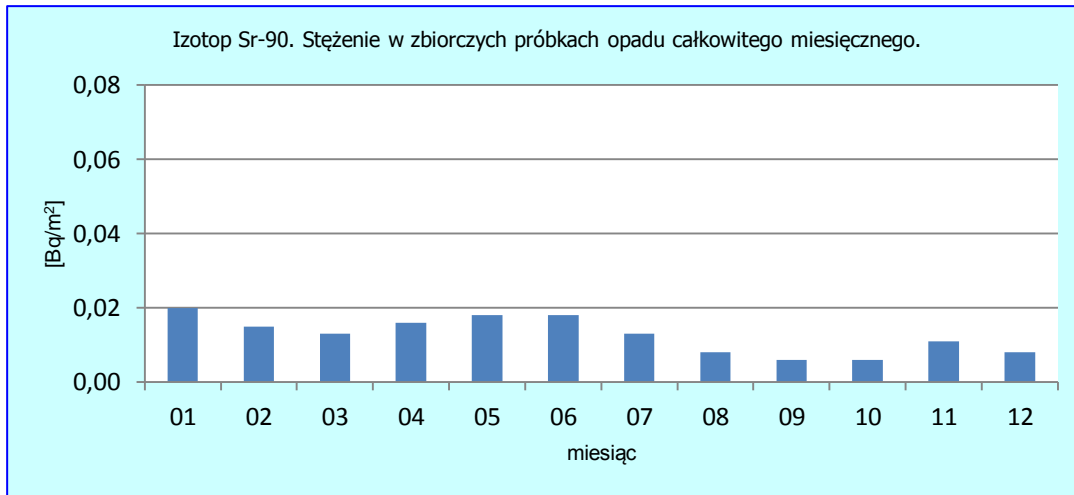
W tych samych zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego, w których analizowano izotopy cezu ^{137}Cs i ^{134}Cs przeprowadzono w 2019 roku pomiary stężeń promieniotwórczych antropogenicznego izotopu strontu – ^{90}Sr , który podobnie jak ^{137}Cs charakteryzuje się stosunkowo długim okresem połowicznego rozpadu (28 lat).

Analiza wyników uzyskanych w roku 2019

Najwyższe stężenie ^{90}Sr zarejestrowano w styczniu ($0,020 \text{ Bq m}^{-2}$) oraz maju i czerwcu ($0,018 \text{ Bq m}^{-2}$). Najniższą aktywność stwierdzono we wrześniu i październiku ($0,006 \text{ Bq m}^{-2}$). Izotop ten w przeciwieństwie do izotopu ^{137}Cs charakteryzują się niższą lotnością, dlatego zarówno sucha, jak i mokra depozycja odpowiada za dopływ ^{90}Sr do powierzchni ziemi, dlatego nie obserwuje się znaczących zmienności w ciągu roku (Tab. 17, Rys. 64).

Tabela 17. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2019 r.

| | Aktywność Bq m^{-2} |
|--------------------|----------------------------------------------------|
| Miesiąc | Sr-90 |
| Styczeń | $0,020 \pm 0,001$ |
| Luty | $0,015 \pm 0,001$ |
| Marzec | $0,013 \pm 0,001$ |
| Kwiecień | $0,016 \pm 0,001$ |
| Maj | $0,018 \pm 0,002$ |
| Czerwiec | $0,018 \pm 0,002$ |
| Lipiec | $0,013 \pm 0,001$ |
| Sierpień | $0,008 \pm 0,001$ |
| Wrzesień | $0,006 \pm 0,001$ |
| Październik | $0,006 \pm 0,001$ |
| Listopad | $0,011 \pm 0,001$ |
| Grudzień | $0,008 \pm 0,001$ |
| Suma roczna | 0,152 |
| Średnia | 0,013 |
| Maksymalna | 0,020 |
| Minimalna | 0,006 |



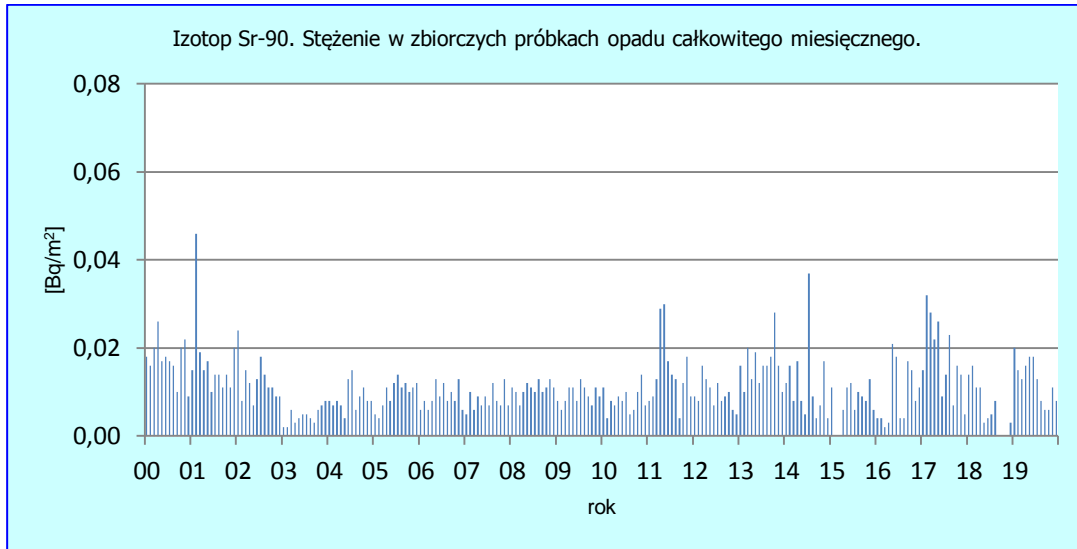
Rys.64. Stężenie promieniotwórcze ⁹⁰Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

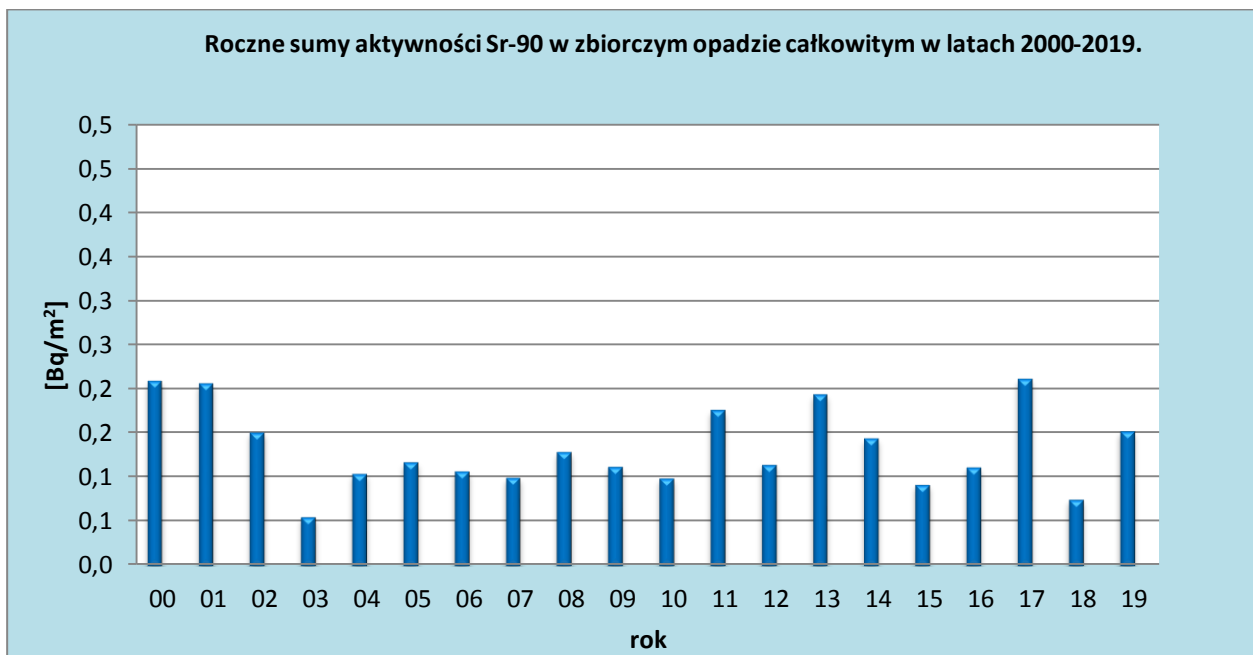
Najwyższe roczne sumy aktywności ⁹⁰Sr w opadzie całkowitym zmierzono w latach 2000, 2001 oraz 2017 (Tab. 18). Wynosiły one odpowiednio: 0,209 Bq m⁻², 0,206 Bq m⁻² i 0,211 Bq m⁻², a najniższą wartość odnotowano w roku 2003 (0,055 Bq m⁻²). Roczny dopływ ⁹⁰Sr wraz z opadem całkowitym w 2019 roku wyniósł 0,152 Bq m⁻² i był zdecydowanie wyższy niż w poprzednim roku. Średnia roczna suma tego izotopu w latach 2000-2019 jest na poziomie 0,133 Bq m⁻².

Tabela 18. Roczna suma aktywności ⁹⁰S w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2019, 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 |
| 2017 | 0,211 |
| 2018 | 0,075 |
| 2019 | 0,152 |
| Średnia | 0,133 |
| Minimalna | 0,055 |
| Maksymalna | 0,211 |



Rys.65. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2019.



Rys.66. Roczne sumy dopływu ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2019.

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

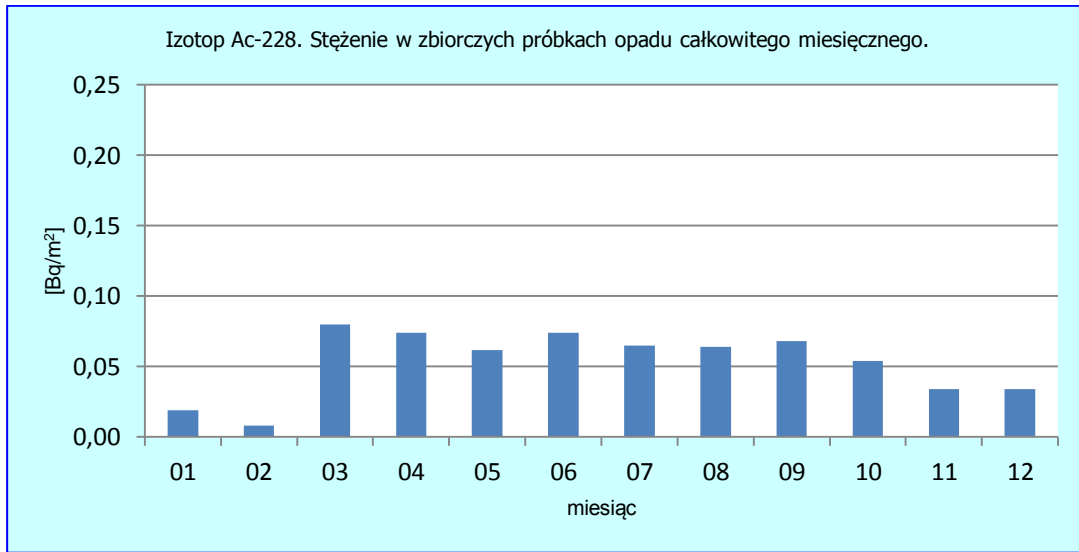
W 2019 roku, w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego oznaczano również stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego: ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac i ^{40}K . Izotop ^{40}K jest najbardziej rozpowszechnionym izotopem z bardzo długim okresem połowicznego rozpadu wynoszącym $1,251 \cdot 10^9$ lat. ^{226}Ra jest produktem rozpadu w szeregu uranowo – 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 2019

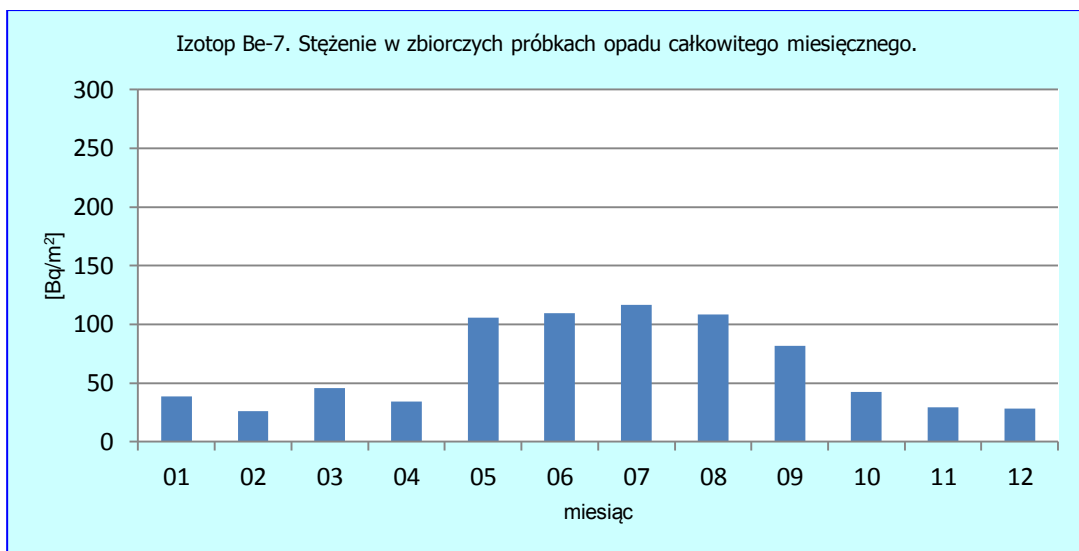
Podobnie jak w latach ubiegłych najwyższą aktywnością charakteryzował się ^7Be . Średnia roczna aktywność tego izotopu wynosiła $63,95 \text{ Bq m}^{-2}$ i wahała się w zakresie od $26,23 \text{ Bq m}^{-2}$ (luty) do $116,77 \text{ Bq m}^{-2}$ (lipiec) (Tabela 16, Rys. 67). Roczny dopływ tego izotopu był zbliżony do wartości z ubiegłego roku i wynosił $767,44 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 19). W 2019 roku aktywność ^{40}K zmieniała się w zakresie od $0,91 \text{ Bq m}^{-2}$ (grudzień) do $3,66 \text{ Bq m}^{-2}$ (lipiec), natomiast roczny dopływ był na poziomie $27,77 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 16, Rys. 68). W przypadku ^{226}Ra roczny dopływ wynosił $1,19 \text{ Bq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ a miesięczne ładunki oscylowały w zakresie poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej (styczeń, październik, grudzień) do $0,211 \text{ Bq m}^{-2}$ (czerwiec) (Tabela 16, Rys. 69). Roczny dopływ ^{228}Ac był prawie dwa razy niższy niż ^{226}Ra i wynosił $0,636 \text{ Bq m}^{-2}$, a jego miesięczne ładunki mieściły się w przedziale od $0,008 \text{ Bq m}^{-2}$ w lutym do $0,080 \text{ Bq m}^{-2}$ w marcu (Tabela 16, Rys. 70).

Tabela 19. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac , ^7Be , ^{40}K oraz ^{226}Ra w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2019 r., [Bq m^{-2}].

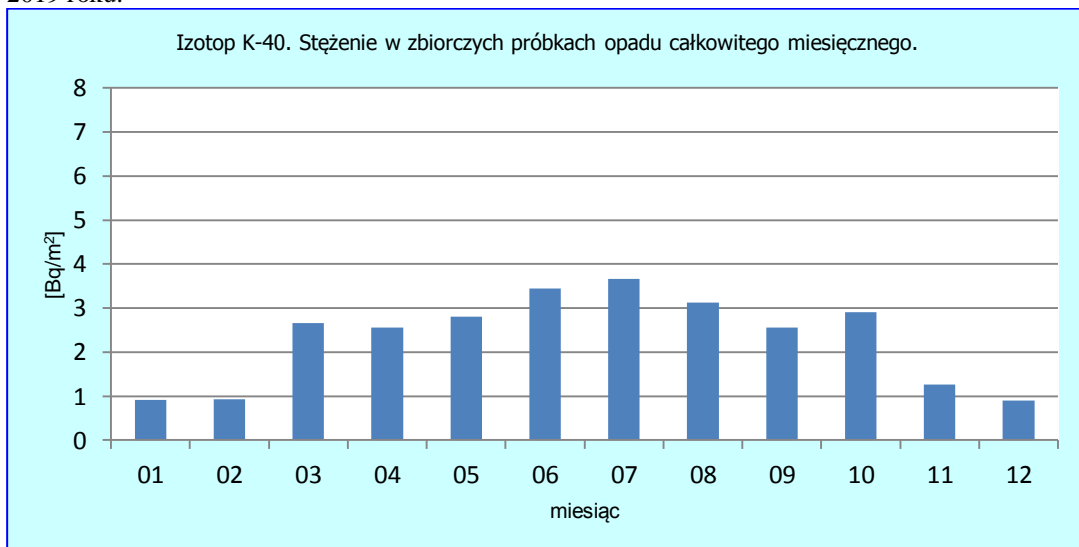
| Miesiąc | ^{228}Ac | ^7Be | ^{40}K | ^{226}Ra |
|--------------------|-------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| Styczeń | 0,019 | 38,690 | 0,923 | - |
| Luty | 0,008 | 26,226 | 0,936 | 0,032 |
| Marzec | 0,080 | 45,612 | 2,660 | 0,093 |
| Kwiecień | 0,074 | 34,264 | 2,564 | 0,169 |
| Maj | 0,062 | 105,902 | 2,813 | 0,182 |
| Czerwiec | 0,074 | 109,615 | 3,447 | 0,211 |
| Lipiec | 0,065 | 116,767 | 3,659 | 0,178 |
| Sierpień | 0,064 | 108,517 | 3,129 | 0,149 |
| Wrzesień | 0,068 | 81,651 | 2,560 | 0,125 |
| Październik | 0,054 | 42,486 | 2,902 | - |
| Listopad | 0,034 | 29,411 | 1,271 | 0,053 |
| Grudzień | 0,034 | 28,296 | 0,905 | - |
| Suma roczna | 0,636 | 767,437 | 27,769 | 1,192 |
| Średnia | 0,053 | 63,953 | 2,314 | 0,132 |
| Maksymalna | 0,080 | 116,767 | 3,659 | 0,211 |
| Minimalna | 0,008 | 26,226 | 0,905 | 0,032 |



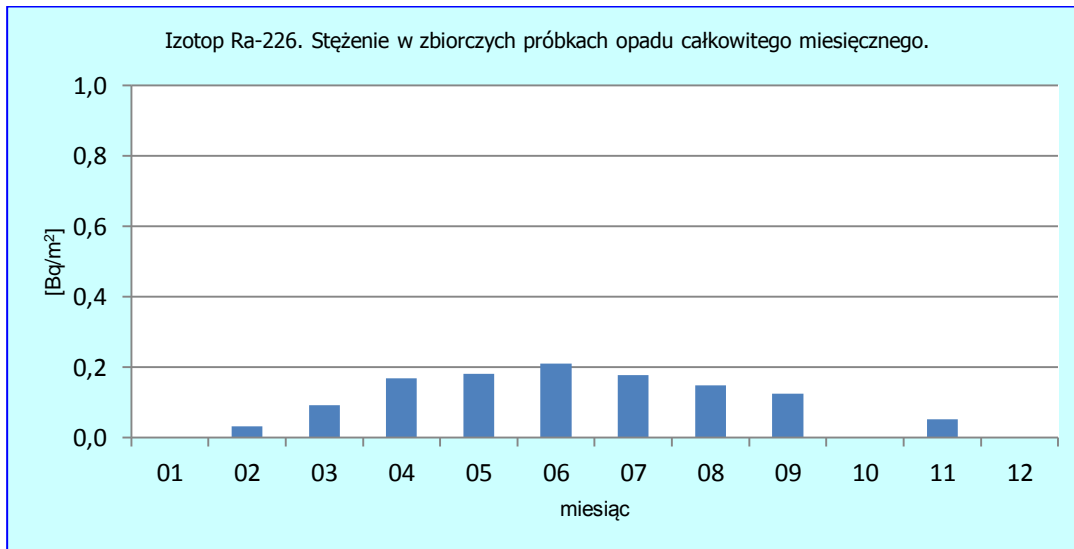
Rys. 67. Stężenie promieniotwórcze ²²⁸Ac w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2019 roku.



Rys.68. Stężenie promieniotwórcze ⁷Be w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2019 roku.



Rys.69. Stężenie promieniotwórcze ^{40}K w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2019 roku.



Rys.70. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w 2019 roku.

Porównanie wyników uzyskanych w roku 2019 z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian i trendów

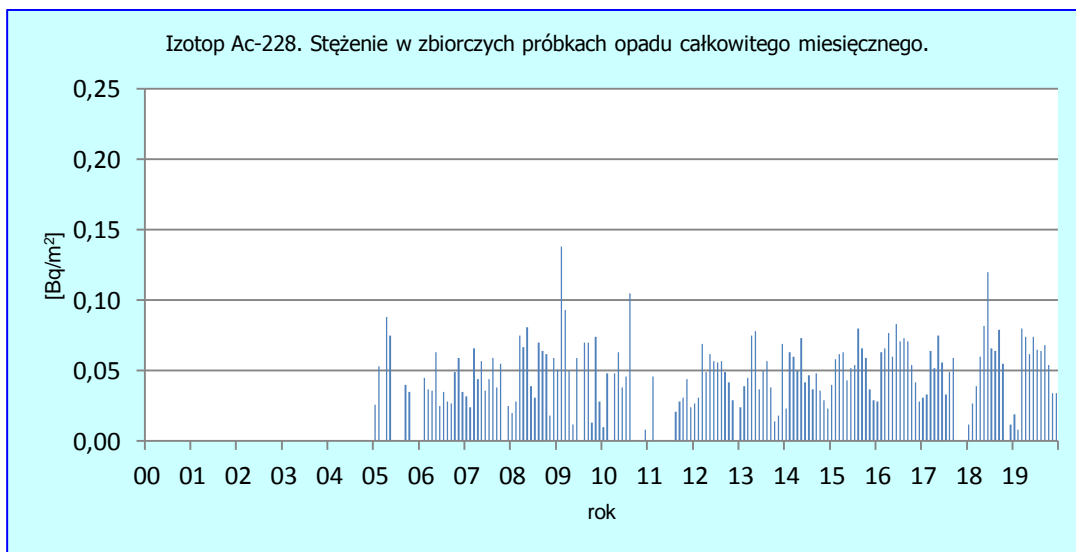
W okresie od 2000 do 2019 roku (Tabela 20) spośród czterech naturalnych promieniotwórczych izotopów największą zmiennością sezonową charakteryzowały się izotopy ^7Be i ^{40}K (Rys. 67-70). Najwyższe ładunki mierzone były w miesiącach letnich i było to spowodowane, podobnie jak w przypadku ^{137}Cs wypłukiwaniem tych izotopów z atmosfery.

W roku 2019 średnie roczne ładunki pierwiastków: ^7Be , ^{40}K i ^{228}Ac były wyższe od średniej z wielolecia (2000-2019), a w przypadku ^{226}Ra ładunek w roku 2019 był niższy od średniej z badanego okresu (Tabela 20).

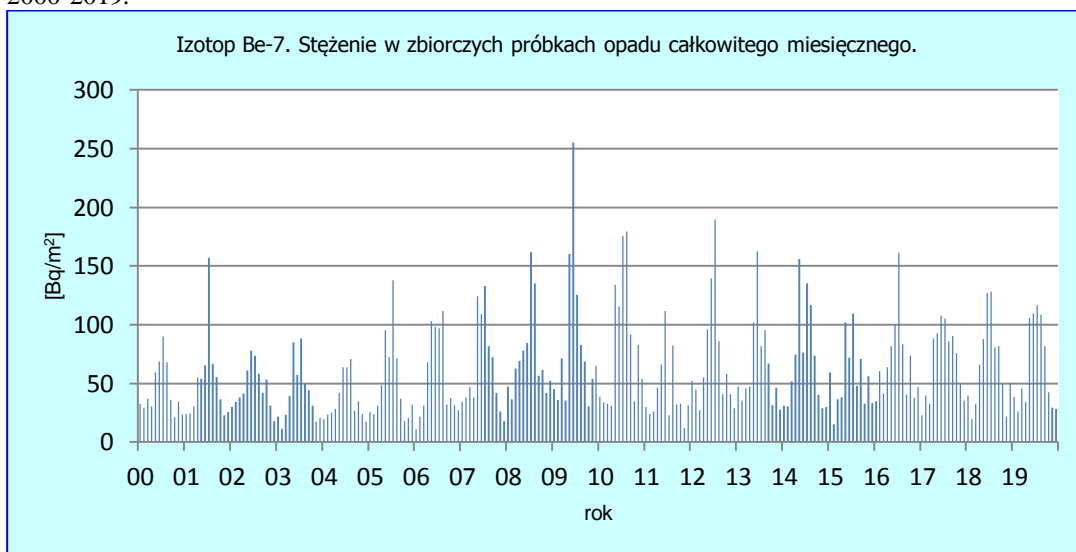
Tabela 20. Roczna suma aktywności ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac , ^{40}K w zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2019, [Bq m⁻²].

| Rok | ^{228}Ac | ^7Be | ^{40}K | ^{226}Ra |
|------|-------------------|---------------|-----------------|-------------------|
| 2000 | - | 531,960 | 19,140 | 2,530 |
| 2001 | - | 618,030 | 15,340 | 2,490 |
| 2002 | - | 559,700 | 19,060 | 2,490 |
| 2003 | - | 489,520 | 19,720 | 2,330 |
| 2004 | - | 439,582 | 20,447 | 2,974 |
| 2005 | 0,402 | 614,147 | 16,064 | 2,584 |
| 2006 | 0,450 | 670,895 | 16,184 | 1,068 |
| 2007 | 0,493 | 764,630 | 16,991 | 1,299 |
| 2008 | 0,614 | 888,322 | 18,764 | 1,817 |
| 2009 | 0,676 | 1029,896 | 15,692 | 1,414 |
| 2010 | 0,366 | 1005,669 | 16,629 | 0,814 |
| 2011 | 0,194 | 517,800 | 16,686 | 0,659 |
| 2012 | 0,528 | 859,883 | 20,504 | 1,393 |
| 2013 | 0,069 | 790,772 | 22,519 | 0,848 |

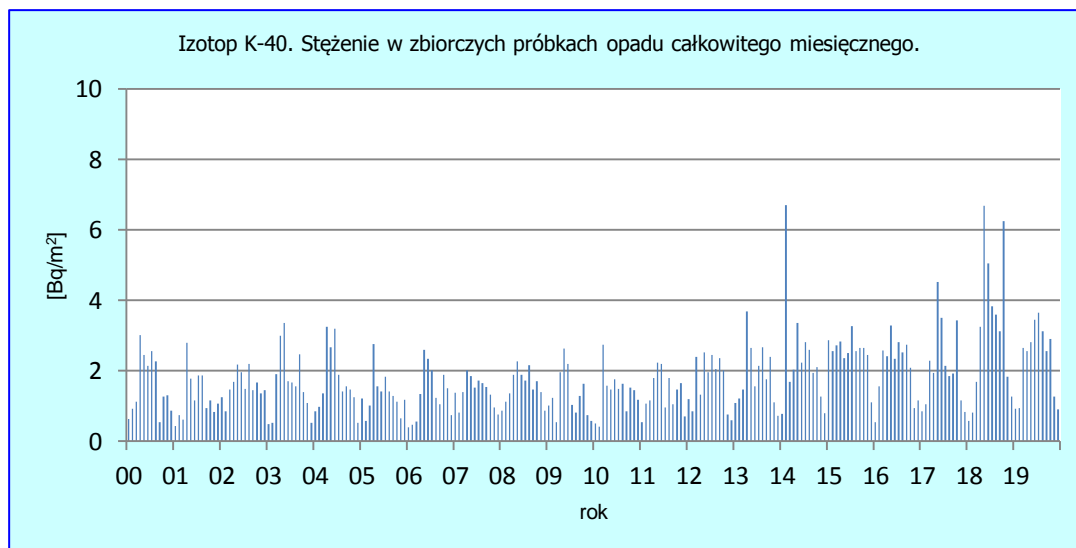
| Rok | ^{228}Ac | ^7Be | ^{40}K | ^{226}Ra |
|-------------|-------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| 2014 | 0,531 | 845,448 | 28,378 | 0,801 |
| 2015 | 0,643 | 673,615 | 30,566 | 0,804 |
| 2016 | 0,716 | 826,462 | 25,006 | 1,450 |
| 2017 | 0,452 | 827,514 | 25,547 | 1,071 |
| 2018 | 0,616 | 785,165 | 38,046 | 1,548 |
| 2019 | 0,636 | 767,437 | 27,769 | 1,192 |
| Średnia | 0,492 | 725,322 | 21,453 | 1,579 |
| Minimalna | 0,069 | 439,582 | 15,340 | 0,659 |
| Maksymalna | 0,716 | 1029,896 | 38,046 | 2,974 |



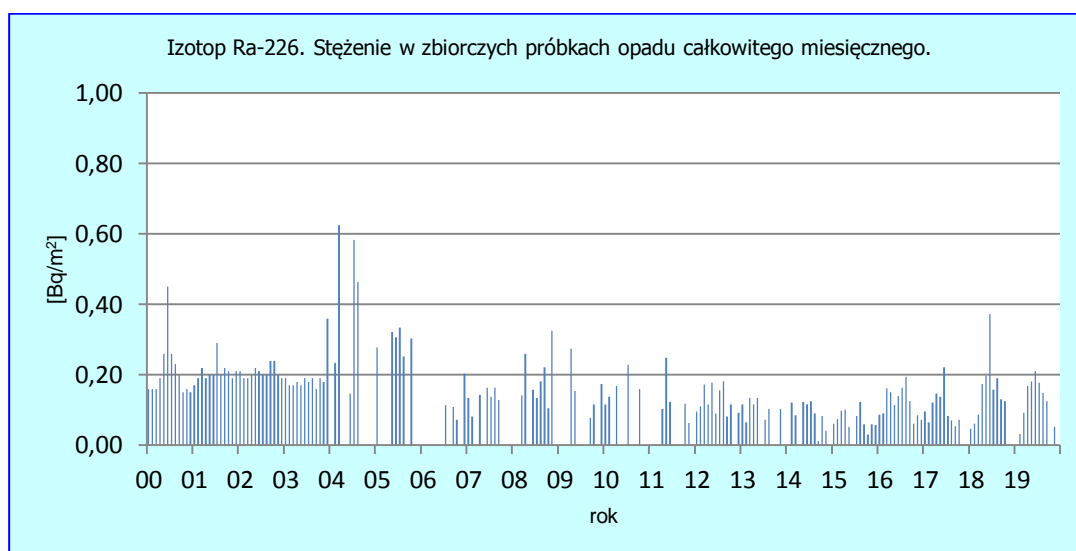
Rys.71. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2019.



Rys.72. Stężenie promieniotwórcze ^7Be w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2019.



Rys. 73. Stężenie promieniotwórcze ^{40}K w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2019.



Rys. 74. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra w zbiorczych próbkach opadu miesięcznego w latach 2000-2019.

4. Podsumowanie

W 2019 roku monitoring radioaktywności przyziemnej warstwy atmosfery prowadzono w ramach umowy 8/2018/F pomiędzy Głównym Inspektorem Ochrony Środowiska a Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytutem Badawczym.

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

W 2019 roku prowadzono pomiary następujących parametrów:

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

Wyniki uzyskane w roku 2019 zestawiono w Tabeli 23 na kolejnej stronie.

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

Tabela 23. Zestawienie wyników uzyskanych w roku 2019.

| Lp. | Rodzaj pomiaru | Wartość średnia/Suma roczna ⁴ | | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| 1. | Moc dawki promieniowania gamma. <i>Wartości na poziomie tła</i> | Wartość średnia 92,6 nSv/h Str. 17,21 | | | |
| 2. | Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach powietrza <i>Wartości na poziomie tła</i> | Wartość średnia 7,5 Bq/m³ Str. 23,26 | | | |
| 3. | Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach <i>Wartości na poziomie tła</i> | Wartość średnia 0,086 Bq/m³ Str. 27,30 | | | |
| 4. | Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach powietrza <i>Wartości na poziomie tła</i> | Wartość średnia 0,337 Bq/m³ Str. 31,34 | | | |
| 5. | Globalna aktywność beta całkowitego opadu dobowego oraz roczna suma aktywności beta całkowitego opadu dobowego. <i>Wartości na poziomie tła</i> | Wartość średnia 0,8 Bq/m² Str. 35 | Suma roczna 0,306 kBq/m² Str. 35 | | |
| 6. | Globalna aktywność beta wody opadowej <i>Wartości na poziomie tła</i> | Wartość średnia 298 mBq/litr Str. 40,44 | | | |
| 7. | Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego <i>Wartości na poziomie tła</i> | Wartość średnia 7,4 Bq/m² Str.49 | | | |
| 8. | Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego <i>Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą</i> | Wartość średnia 0,024 Bq/m² Str. 50 | Suma roczna 0,284 Bq/m² Str.50,53 | | |
| 9. | Stężenie promieniotwórcze ¹³⁴ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego <i>Bardzo niskie wartości na poziomie zdolności detekcyjnych aparatury</i> | Poniżej zdolności detekcji | | Poniżej zdolności detekcji | |
| 10. | Stężenie promieniotwórcze ⁹⁰ Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. <i>Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą</i> | Wartość średnia 0,013 Bq/m² Str. 54 | Suma roczna 0,152 Bq/m² Str. 54,55 | | |
| 12. | Sumy roczne aktywności ²²⁸ Ac, ⁷ Be, ⁴⁰ K, ²²⁶ Ra, w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. [Bq/m ²] <i>Wartości na poziomie tła</i> Str. 60 | Ac-228 0,636 | Be-7 767,437 | K-40 27,769 | Ra-226 1,192 |

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

5. Wnioski

Poziom promieniotwórczości w przyziemnej warstwie atmosfery związany z obecnością naturalnych izotopów promieniotwórczych w 2019 roku nie odbiegał w sposób znaczący od poziomu, który obserwowano w latach poprzednich. Poziom promieniotwórczości związany z obecnością sztucznych izotopów promieniotwórczych podlegał wahaniom i był znacząco wyższy od lat ubiegłych, jednak nadal są to bardzo niskie wartości, niestanowiące zagrożenia.

Średnia roczna wartość mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu wyznaczona na podstawie danych dobowych zmierzonych na 9 stacjach w 2019 roku wynosiła $92,6 \text{ nSv h}^{-1}$ i była wyższa, ale bardzo zbliżona do obserwowanej w roku poprzednim $92,5 \text{ nSv h}^{-1}$. W latach 2000 - 2018 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. Średnia wartość mocy dawki promieniowania gamma uzyskana ze średnich rocznych w badanych latach wynosi $94,1 \text{ nSv h}^{-1}$.

W roku 2019 średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolach zawieszonych w powietrzu było niższe niż w roku ubiegłym i wynosiło $7,5 \text{ Bq m}^{-3}$ podobnie jak w 2007. Średnia obliczona na podstawie danych z okresu 2000 – 2019 wynosi $7,1 \text{ Bq m}^{-3}$.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w 2019 roku wyniosło $0,086 \text{ Bq m}^{-3}$ i było wyższe o $0,042 \text{ Bq m}^{-3}$ niż w roku poprzednim. Odnotowana wartość jest także najwyższą spośród średnich rocznych stężeń obserwowanych w latach 2000 – 2019. Najniższe średnie roczne stężenie w tym okresie odnotowano w 2001 roku ($0,004 \text{ Bq m}^{-3}$). Średnie stężenie wyznaczone dla omawianego okresu wynosiło $0,035 \text{ Bq m}^{-3}$.

W 2019 roku średnie roczne stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta wyniosło $0,337 \text{ Bq m}^{-3}$ i było wyższe niż w roku ubiegłym. Wartość ta jest również najwyższą spośród odnotowanych średnich stężeń w latach 2000 – 2019. W badanym okresie najniższe średnie roczne stężenia radioaktywności przypadają na lata 2000 - 2011 ($< 0,1 \text{ Bq m}^{-3}$), znaczny wzrost następuje od 2015 roku, gdzie wartości są ponad czternastokrotnie wyższe niż minimalne średnie stężenie przypadające na rok 2001. Aktywności te można jednak uznać za niskie pozostające na poziomie tła i niestanowiące zagrożenia. Średnia aktywność badanego promieniowania w aerozolach w badanym okresie wyniosła $0,114 \text{ Bq m}^{-3}$.

Stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie alfa i beta w aerozolach 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, obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wyznaczonych stacjach w 2019 roku ($0,31 \text{ kBq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$), była równa wartościom w latach 2006, 2007, 2013, 2015, 2016. Wartość średnia obliczona dla okresu 2000-2019 utrzymuje się na poziomie $0,32 \text{ kBq m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$.

Średnia aktywność beta wody opadowej w 2019 roku wyniosła 298 mBq l^{-1} i była niższa niż w ubiegłym roku. Wartość ta jest najniższą odnotowaną w okresie od 2000 do 2019 roku. Maksymalna aktywność w badanych latach przypada na rok 2003 i wynosi 376 mBq l^{-1} , Średnia aktywność beta wody opadowej w omawianym okresie wynosi 341 mBq l^{-1} .

W 2019 roku średnia aktywność promieniowania beta w całkowitym opadzie miesięcznym wynosiła $7,4 \text{ Bq m}^{-2}$ i była niższa niż w roku ubiegłym – $8,4 \text{ Bq m}^{-2}$. W omawianym okresie średnia aktywność promieniowania beta wahała się w przedziale od 6 Bq m^{-2} (2005) do $8,7 \text{ Bq m}^{-2}$ (2017), a średnia aktywność całkowitego opadu atmosferycznego w latach 2000 - 2019 wynosi $7,2 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 14).

W 2019 roku średnie stężenie ^{137}Cs w opadzie atmosferycznym wynosiło $0,024 \text{ Bq m}^{-2}$, natomiast stężenia ^{134}Cs były poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej. Najniższe aktywności promieniotwórcze ^{137}Cs odnotowano w miesiącach: luty ($0,006 \text{ Bq m}^{-2}$) oraz styczeń ($0,008 \text{ Bq m}^{-2}$), natomiast najwyższe wystąpiły w kwietniu ($0,051 \text{ Bq m}^{-2}$) i maju ($0,050 \text{ Bq m}^{-2}$). Taki rozkład stężeń w roku jest związany z intensywnymi opadami oraz łatwiejszym wyflukiwaniem izotopów z atmosfery.

Roczna suma dopływu ^{137}Cs w 2019 roku wynosiła $0,284 \text{ Bq m}^{-2}$ i była o $0,141$ niższa od wartości w 2017 ($0,425 \text{ Bq m}^{-2}$), a jednocześnie około 3,5 razy mniejsza od wartości uzyskanej 2011 ($1,067 \text{ Bq m}^{-2}$), kiedy odnotowano podwyższoną depozycję na skutek awarii elektrowni atomowej w Fukushima. Minimalny sumaryczny dopływ ^{137}Cs przypadał na rok 2013 ($0,262 \text{ Bq m}^{-2}$). W okresie 2000 – 2019 średnia suma rocznych dopływów ^{137}Cs wynosił $0,549 \text{ Bq m}^{-2}$.

W przypadku izotopu ^{134}Cs , tylko w roku 2011 i 2012 określono jego dopływ, w pozostałych latach stężenia nie przekraczały limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej.

Najwyższe stężenie ^{90}Sr w 2019 roku zarejestrowano w styczniu ($0,020 \text{ Bq m}^{-2}$) oraz maju i czerwcu ($0,018 \text{ Bq m}^{-2}$). Najniższą aktywność stwierdzono we wrześniu i październiku ($0,006 \text{ Bq m}^{-2}$).

Najwyższe roczne sumy aktywności ^{90}Sr w opadzie całkowitym zmierzono w latach 2000, 2001 oraz 2017. Wynosiły one odpowiednio: $0,209 \text{ Bq m}^{-2}$, $0,206 \text{ Bq m}^{-2}$ i $0,211 \text{ Bq m}^{-2}$, a najniższą wartość odnotowano w roku 2003 ($0,055 \text{ Bq m}^{-2}$). Roczny dopływ ^{90}Sr wraz z opadem całkowitym w 2019 roku wyniósł $0,152 \text{ Bq m}^{-2}$ i był zdecydowanie wyższy niż w poprzednim roku. Średnia roczna suma tego izotopu w latach 2000-2019 jest na poziomie $0,133 \text{ Bq m}^{-2}$.

W okresie od 2000 do 2019 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 wyflukiwaniem tych izotopów z atmosfery.

W roku 2019 średnie roczne ładunki pierwiastków: ^7Be , ^{40}K i ^{228}Ac były wyższe od średniej z wielolecia (2000-2018), a w przypadku ^{226}Ra ładunek w roku 2019 był niższy od średniej z badanego okresu.

Pod koniec września 2017 roku w Polsce został wykryty ^{106}Ru w całkowitym opadzie atmosferycznym. Średnia suma aktywności promieniotwórczej tego izotopu w 2018 roku wyniosła $0,432 \text{ Bq m}^{-2}$ i była prawie 16 krotnie niższa niż w roku 2017.

W 2019 roku nie wykryto już skażeń ^{106}Ru .