



INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
CENTRUM MONITORINGU KLIMATU POLSKI



WYKONYWANIE POMIARÓW W SIECI WCZESNEGO WYKRYWANIA SKAŻEŃ PROMIENIOTWÓRCZYCH W LATACH 2011 - 2012

ETAP IX RAPORT PRZEDSTAWIAJĄCY WYNIKI ZA ROK 2012



Dofinansowano ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej

Praca wykonana na podstawie Umowy z GIOŚ nr 2/2011/F finansowanej ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy nr 588/2010/WN-7/MN-BD/D zawartej w dniu 28.10.2010 roku o dofinansowanie państwowej jednostki budżetowej w formie przekazania środków na cele nieinwestycyjne.

Dr inż. Tamara Zalewska
Mgr Andrzej Czuryłowski
Mgr Paweł Mischuk

WARSZAWA 2013

Spis treści:

Część I

| | |
|--|----|
| 1. Wstęp - cel i zakres pracy | 4 |
| 2. Metodyka badań prowadzonych na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych | 6 |
| 2.1. Pobór i przygotowanie próbek | |
| 2.2. Metody pomiarowe wraz z opisem systemu zapewniania jakości pomiarów | |
| 3. Wyniki i omówienie wyników | 15 |
| 3.1. Moc dawki promieniowania gamma w powietrzu | 34 |
| 3.1.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012 | 34 |
| 3.1.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych | 35 |
| 3.2. Radioaktywności alfa naturalna i sztuczna oraz beta sztuczna próbek aerozoli powietrza | 36 |
| 3.2.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012 | 36 |
| 3.2.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian | 39 |
| 3.3. Globalna aktywności beta dobowego i miesięcznego opadu całkowitego | 41 |
| 3.3.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012 | 41 |
| 3.3.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian | 44 |
| 3.4. Stężenia promieniotwórcze wybranych sztucznych i naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego | 46 |
| 3.4.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012 | 46 |
| 3.4.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian | 47 |
| 3.5. Aktywność Sr-90 w zbiorczych próbach miesięcznego opadu całkowitego | 54 |
| 3.5.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012 | 54 |
| 3.5.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian | 55 |
| 4. Wnioski | 57 |
| 5. Podsumowanie | 58 |

Część II

Syntetyczne opracowanie informacji dla ogółu społeczeństwa (dla osób niezwiązanych bezpośrednio z pomiarami radioaktywności) o stanie radiacyjnym powietrza w kraju w oparciu o dane pomiarowe z części I.

| | |
|--|----|
| Słowo wstępne | 59 |
| Słownik użytych pojęć i terminów. | |
| I. Radioaktywność naturalna w środowisku – wprowadzenie | 61 |
| 1. Wyniki pomiarów beta w opadzie całkowitym | |
| 2. Wyniki pomiarów radionuklidów naturalnych w opadzie całkowitym | |
| 3. Wyniki pomiarów mocy dawki promieniowania gamma | |
| 4. Wyniki pomiarów promieniowania aerozoli alfa naturalnych w powietrzu | |
| 5. Interpretacja wyników oraz odniesienie ich do poprzednich lat | |
| II. Radioaktywność sztuczna w środowisku – wprowadzenie | 63 |
| 1. Wyniki pomiarów radionuklidów sztucznych w opadzie całkowitym | |
| 2. Wyniki pomiarów promieniowania aerozoli alfa i beta sztucznych w powietrzu | |
| 3. Interpretacja wyników oraz odniesienie ich do poprzednich lat | |
| III. Meteorologia a radioaktywność powietrza | 64 |
| 1. Związki parametrów meteorologicznych i wartości promieniowania gamma oraz radioaktywności aerozoli powietrza | |
| 2. Przykładowe wykresy pokazujące związki parametrów meteorologicznych i wartości promieniowania gamma oraz radioaktywności aerozoli powietrza | |
| IV. Podsumowanie | 65 |

1. Wstęp – 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 2010-2012¹. 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.

IMGW - PIB realizując podpisaną z Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska umowę pt.: „Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych w latach 2011 – 2012.” zobowiązane jest do wykonania pomiarów promieniowania gamma w powietrzu przy powierzchni ziemi oraz pomiarów radioaktywności próbek aerozoli powietrza i opadu całkowitego w okresie od 1 marca 2011 r. do 31 maja 2013 r. 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 fakt, 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 2012 wraz z komentarzem uwzględniającym dane z lat poprzednich. Wyniki przedstawiono w postaci Tabelaicznej i graficznej.

¹ <http://www.gios.gov.pl/artykuly/70/Aktualny-program-Panstwowego-Monitoringu-Srodowiska> strona 89 i 90.



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

2. Metodyka badań prowadzonych na stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych.

2.1. Pobór próbek

2.2. Metody analityczne wraz z opisem systemu zapewniania jakości pomiarów.

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

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

Pomiar mocy dawki promieniowania gamma

Pomiary mocy dawki promieniowania gamma w stacjach meteorologicznych prowadzone są za pomocą sondy typu FHZ621G-L współpracującej z komputerem PC. Sonda składa się z licznika proporcjonalnego, przedwzmacniacza, modułu mikrokontrolera, interfejsu szeregowego RS-485 i zasilaczy niskiego i wysokiego napięcia.

Dane techniczne.

Komora pomiarowa: licznik proporcjonalny wypełniony Ar/CO₂, napięcie pracy – 2050 V; zakres pomiarowy – 50 nSv/h – 100 mSv/h, zakres energetyczny – ± 30 % dla zakresu 30 keV – 1,3 MeV, zakres kątowy rejestracji - ± 20 % w zakresie $-450 < \Phi < +450$

Dane sondy: zasilanie – 10 ÷ 30 V, temperatura - -30 - +60 0C, wilgotność względna – 5 – 95 %, ciśnienie atmosferyczne – 533 – 1060 hPa.

W stacjach wykrywania skażeń promieniotwórczych IMGW sondy FHZ 621G-L zostały ustawione w ogródku meteorologicznym na specjalnym wsporniku, na wysokości 1 m od podłoża.

Sonda połączona jest kablem poprzez interfejs przetwornika z komputerem PC, w którym zainstalowany

program NetView umożliwia zdalne ustawianie warunków pracy sondy, jak i odbiór wyników pomiarów.

Wewnętrzna pamięć układu sondy może przechować 256 zmierzonych wartości zaopatrzonych w datę i czas pomiaru oraz w status określający stan układu pomiarowego. Każdy błąd układu pomiarowego jest kodowany w formie statusu wpisanego w informację o wartości mierzonej wielkości. Czas pomiaru każdego wyniku mocy dawki wynosi 10 minut. Program NetView co 10 minut odczytuje z pamięci sondy ostatni wynik i zapisuje go do pliku oraz porównuje z zadanymi progami ostrzegawczymi I i II stopnia. Wyniki mocy dawki z danego miesiąca zbierane są w pliku, w nazwie, którego podany jest rok, nr kanału oraz - w rozszerzeniu – miesiąc.

W przypadku przekroczenia zadanego progu program włącza odpowiednią planszę sygnalizującą przekroczenie pierwszego progu lub planszę i sygnał dźwiękowy przy przekroczeniu drugiego progu. Wartości te są dobierane tak, aby przyrost mocy dawki podczas opadów nie przekraczał zadanych progów. Sygnalizacja ta w programie NetView służy obecnie jedynie obserwatorowi jako informacja o wzroście mocy dawki.

Producent zapewnił w sondzie procedurę wyznaczania procentowego udziału energii kwantów gamma produktów rozszczepienia w mierzonej wielkości mocy dawki. W tym celu wykorzystano właściwości szeroko zakresowego detektora FHZ621G-L, który wyznacza nie tylko wielkość mocy dawki, ale również mierzy energię promieniowania gamma. Dzięki temu możliwe jest wykrycie każdego wpływu sztucznej gammy automatycznie i przesłanie informacji o tym do systemu komputerowego nawet, jeśli wzrost mocy dawki jest stosunkowo niski. Mierzona jest różnica energii kwantów promieniowania gamma produktów rozszczepienia w stosunku do promieniowania kosmicznego i tła naturalnego.

Promieniowanie naturalne charakteryzuje się dużym udziałem wysokoenergetycznych kwantów (> 1 MeV), co jest prawdziwe dla zmiennego w czasie udziału wymywanych produktów rozpadu radonu. Niższe od 1 MeV energie kwantów odnoszą się do produktów rozszczepienia.

Dla typowego tła 100-130 nSv/h możliwe jest wiarygodne wyznaczenie w czasie 20 – 30 min rutynowego pomiaru dodatkowej mocy dawki od Xe-133, od mocy dawki spowodowanej wymywaniem produktów rozpadu radonu. Ponadto licznik proporcjonalny charakteryzuje się możliwością detekcji energii już od 33 keV, dzięki czemu możliwe jest także uwzględnienie właściwego zakresu niskoenergetycznego spowodowanego rozproszeniem Comptona.

W stacjach wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych IMGW po zainstalowaniu nowej sondy typu FHZ621 G-L uruchomiono procedurę pomiaru i rejestracji procentu mierzonej mocy dawki pochodzącej od produktów rozszczepienia. Opracowano specjalny program komputerowy, który przetwarza wyniki pomiarów sondy (mocy dawki i jej procentu pochodzącego od produktów rozszczepienia) i wyświetla średnie godzinne wartości procentu mocy dawki pochodzącej od produktów rozszczepienia i podaje przyrost mocy dawki w stosunku do jej średniej dobowej wartości.

Pomiar radioaktywności próbek aerozoli powietrza

Do pomiaru aktywności aerozoli powietrza stosuje się urządzenie typu FHT59Si, które mierzy w sposób ciągły aktywności radioizotopów naturalnych i sztucznych alfa promieniotwórczych oraz całkowitą aktywność radioizotopów beta promieniotwórczych.

Zasada pomiaru radioaktywności w tego typu urządzeniu polega na zasysaniu przez filtr taśmowy aerozoli powietrza i jednoczesnym pomiarem detektorem umieszczonym nad taśmą filtracyjną aktywności radionuklidów alfa i beta promieniotwórczych. Użytkowana jest taśma z włókna szklanego typu GF-10. Powierzchnia osadzania aerozoli na taśmie ma kształt koła o średnicy 50 mm, przez które w ciągu 30 min. zasysane jest powietrze, po czym następuje kilkusekundowa przerwa w zasysaniu i przesuw taśmy o 1/10 średnicy powierzchni zbierania aerozoli. Taki częściowy przesuw powierzchni osadzania służy do utrzymania równowagi rozpadu naturalnych radionuklidów na filtrze. Pomiary szybkości zliczeń promieniowania alfa i beta realizowane są w procedurze dyskryminacji amplitudy. Do obliczania aktywności całkowitej, jak i naturalnej stosuje się specjalny „algorytm pomiaru aerozoli”. Aktywność alfa i beta sztucznych radionuklidów wyznaczana jest jako różnica pomiędzy aktywnością całkowitą danego promieniowania a naturalną. Uwzględniając objętość przepompowanego powietrza przez filtr możliwe

jest wyznaczenie aktywności danego promieniowania.

Urządzenie typu FHT59Si składa się z następujących elementów:

- zespołu poboru powietrza z pompą próżniową ($8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), systemem pomiaru i kontroli przepływu powietrza przez filtr taśmowy;
- mechanizmu przesuwu filtru taśmowego sterowanego procesorem;
- detektora krzemowego typu PIPS z osłoną ołowianą;
- komputerowego modułu pomiarowego FHT 8000 z interfejsem szeregowym do transmisji wyników.

Urządzenie FHT59Si umożliwia:

1. Automatyczny pomiar aktywności naturalnych i sztucznych radionuklidów alfa i beta promieniotwórczych aerozoli powietrza.
2. Pomiar stężeń promieniotwórczych izotopów emitujących promieniowanie alfa i beta w zakresie od $0,1$ do 10^6 Bq m^{-3} .
3. Automatyczną kompensację aktywności radionuklidów naturalnych dzięki specjalnemu algorytmowi.
4. Szybkie wykrywanie nagłego wzrostu aktywności emiterów alfa i beta promieniotwórczych za pomocą specjalnej funkcji.
5. Automatyczną kontrolę pracy urządzeń sygnalizując wystąpienie ewentualnych błędów.

Detektor

Zestaw aparatury FHT 59 Si wyposażony jest w detektor krzemowy typu PIPS o powierzchni aktywnej równej 1700 mm^2 . Wydajność detektora w stosunku do geometrii 4π wyznaczona za pomocą źródła płaskiego o średnicy 50 mm umieszczonego w komorze pomiarowej wynosi jak podano w tabeli poniżej.

| Radionuklid | Wydajność % |
|-------------|-------------|
| Co-60 | 6 ± 1 |
| Sr-90/Y-90 | 21 ± 2 |
| Cs-137 | 19 ± 2 |
| Tl-204 | 18 ± 2 |
| Am-241 | 17 ± 1 |

Zasada działania algorytmu pomiaru radioaktywności aerozoli powietrza.

Budowa algorytmu bazuje na odpowiednim sposobie pobierania próbek aerozoli i utrzymywaniu równowagi rozpadu naturalnych radionuklidów osadzonych na taśmie filtracyjnej oraz na właściwościach spektrometrycznych zastosowanego detektora krzemowego. Ustawione progi dyskryminacji ($S_1 = 0,1 \text{ MeV}$, $S_2 = 0,8 \text{ MeV}$, $S_3 = 5,5 \text{ MeV}$, $S_4 = 6,1 \text{ MeV}$ i $S_5 = 7,7 \text{ MeV}$) pozwalają na rejestrowanie liczby impulsów w poszczególnych przedziałach dyskryminacji pochodzących od określonych radioizotopów naturalnych, co przy znajomości wydajności dla danego promieniowania pozwala na wyznaczanie ich aktywności.

Współczynniki wydajności urządzenia dla promieniowania alfa i beta są wyznaczane za pomocą odpowiednich wzorców kalibracyjnych o znanej aktywności. Za pomocą algorytmu dla pobieranej próbki aerozoli wyznacza się aktywność całkowitą promieniowania alfa i beta oraz aktywność alfa i beta radioizotopów naturalnych. Różnica tych dwóch aktywności traktowana jest jako aktywność pochodząca od radioizotopów sztucznych.

Oznaczając przez R_1 całkowitą liczbę zliczeń w ciągu 1 sek. od radioizotopów alfa i beta promieniotwórczych dla progu S_1 , a ich składowe przez R_{b1} liczba zliczeń od radioizotopów beta promieniotwórczych i R_{a1} od alfa promieniotwórczych oraz przez R_{01} tło detektora, to możemy napisać:

$$R_1 = R_{a1} + R_{b1} + R_{01} \quad (1)$$

Jeśli oznaczyć odpowiednio wydajność alfa i beta dla progu S_1 przez E_{a1} i E_{b1} , to otrzymamy:

$$E_{a1} = \frac{R_{a1}}{A_{aca}} \quad (2) \quad \text{i} \quad E_{b1} = \frac{R_{b1}}{A_{bca}} \quad (3)$$

Wstawiając powyższe wartości do równania (1) otrzymamy:

$$R_1 = E_{a1}A_{aca} + E_{b1}A_{bca} + R_{01} \quad (4)$$

Analogiczne równanie możemy zapisać dla drugiego przedziału dyskryminacji:

$$R_2 = E_{a2}A_{aca} + E_{b2}A_{bca} + R_{02} \quad (5)$$

Rozwiązując powyższe równania wyznaczamy aktywności całkowite promieniowania alfa (A_{aca}) i beta (A_{bca}). Współczynniki wydajności są jednoznacznie określane podczas kalibracji aparatury wzorcami alfa i beta promieniotwórczymi.

W podobny sposób możemy napisać równania dla aktywności naturalnych radioizotopów alfa (A_{an}) i beta (A_{bn}) promieniotwórczych i tak :

$$A_{an} = \frac{1}{E_{a2}} F_a(g_3R_3 + g_4R_4 + g_5R_5) \quad (6)$$

$$A_{bn} = \frac{1}{E_{b1}} F_b(h_3R_3 + h_4R_4 + h_5R_5) \quad (7)$$

gdzie :

R_3 - liczba zliczeń impulsów w ciągu 1 s dla progu S_3 (5,5 MeV);

R_4 - „ - „ S_4 (6,1 MeV);

R_5 - “ - “ S_5 (7,7 MeV);

g_3, g_4 i g_5 - współczynniki kompensacyjne radioizotopów alfa promieniotwórczych, wyznaczone eksperymentalnie;

h_3, h_4 i h_5 - współczynniki kompensacyjne radioizotopów beta promieniotwórczych wyznaczone eksperymentalnie;

F_a, F_b - współczynniki dopasowania.

Sztuczna radioaktywność alfa (A_{asz}) i beta (A_{bsz}) radioizotopów osadzonych na taśmie filtracyjnej jest wyznaczona jako różnica aktywności całkowitej i naturalnej danego promieniowania, a mianowicie :

$$A_{asz} = A_{aca} - A_{an} \quad \text{oraz}$$

$$A_{bsz} = A_{bca} - A_{bn}$$

Komputerowy moduł pomiarowy FHT 8000

Moduł ten służy do kontroli pomiaru i opracowania wyników oraz zawiera pełną elektronikę jądrową do obsługi detektora. Pracuje w sposób automatyczny. Wszystkie procedury pomiarowe, algorytmy są zapamiętane w formie pakietów oprogramowania i służą do kontroli wszystkich podzespołów urządzenia. Wyniki pomiarowe i status są automatycznie zapamiętywane i mogą być również przesłane za pomocą interfejsu szeregowego do zewnętrznego komputera.

W naszym przypadku moduł FHT 8000 podłączony jest do komputera PC, ustawionego w pokoju obserwatora stacji meteorologicznej. Za pomocą programu NetView zainstalowanego w komputerze PC odczytywane są wyniki mierzonych wielkości z pamięci modułu FHT 8000 i zapisywane w oddzielnych plikach. Program ten pozwala na wizualizację zarejestrowanych wyników oraz porównuje zbierane wartości z zadanymi progami ostrzegawczymi, sygnalizując ich przekroczenie wyświetleniem odpowiednich napisów i włączeniem sygnału dźwiękowego. Jest to sygnalizacja przewidziana dla personelu stacji. Doba pomiarowa próbki aerozolowej trwa od godziny 6⁰⁰ do 6⁰⁰ następnego dnia i liczona jest jako średnia z godzinnych wartości. W ten sposób otrzymuje się średnią aktywność promieniowania alfa naturalnych nuklidów oraz aktywności promieniowania alfa i beta sztucznych nuklidów. Aktywności tych ostatnich otrzymywane jako wynik odejmowania aktywności naturalnej od całkowitej obarczone są pewnym błędem, wielkość którego uzależniona jest od doboru wprowadzanych

współczynników kompensacyjnych w równaniach algorytmu pomiarów aerozolowych. Bezwzględność wyników mierzonych wielkości uzyskuje się za pomocą procedury kalibracyjnej, w czasie której wykonuje się 3-minutowe pomiary tła dla promieniowania alfa i beta oraz kolejno liczbę zliczeń wzorców: Am-241 i Sr-90 (o aktywności po 3 kBq). Wyniki koncentracji aktywności podawane są w Bq m⁻³.

Próg czułości detektora dla promieniowania beta wynosi 300 mBq m⁻³, a dla promieniowania alfa – 60 mBq m⁻³.

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

Pomiary całkowitej aktywności beta tj. aktywności związanej ze stężeniem promieniotwórczym izotopów promieniotwórczych emitujących promieniowanie beta w próbkach opadu całkowitego wykonywane są z zastosowaniem komputerowych zestawów pomiarowych zintegrowanych z sondą pomiarową typu 51Y1SPFM i przedwzmacniaczem AS-17 lub z zastosowaniem głowicy antykoincydencyjnej typu UGB-2.

Kalibrację aparatury do pomiarów aktywności beta próbek opadu całkowitego wykonuje się za pomocą wzorca K-40 o aktywności 3,7 Bq.

Aktywność próbki opadu całkowitego wyznacza się z wzoru:

$$A_F = K_F \times N_0 \text{ [Bq m}^{-3} \text{]}, \text{ gdzie:}$$

$$K_F = \frac{A_w}{N_0 \times S} \left[\frac{\text{Bq} \times \text{min}}{\text{imp} \times \text{m}^2} \right]$$

$$N_0 = N - N_t$$

N – liczba imp/min pomiaru próbki lub wzorca,

N_t - liczba imp/min pomiaru tła,

S – powierzchnia zbierająca naczynia

Błąd statystyczny bezwzględny przy prawdopodobieństwie 95 % wyznacza się z zależności

$$\Delta = 1,96 \sqrt{\frac{N}{T} + \frac{N_t}{T_t}}, \text{ gdzie:}$$

T – czas pomiaru próbki,

T_t – czas pomiaru tła,

$$\text{a błąd względny ze wzoru: } a = \frac{\Delta}{N_0} 100\% .$$

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 wykonuje się za pomocą zestawu spektrometrycznego składającego się z detektora HPGe o objętości 132,5 cm³, przedwzmacniacza ładunkowego (typu RG11), zasilacza wysokiego napięcia (typu 7716) i analizatora amplitudy impulsów. Analizator skonstruowany w postaci karty, instalowanej w komputerze IBM-PC wraz z oprogramowaniem, umożliwia opracowanie matematyczne widma oraz jego wizualizację i archiwizację. Detektor germanowy jest umieszczony w domku osłonnym o ściankach grubości 10 cm Pb, wyłożonych od wewnątrz blachą: 1 mm Cd i 2 mm Cu. Do kalibracji

spektrometru użyto wzorcowego roztworu promieniotwórczego SRM-1 Mix gamma przygotowanego przez Ośrodek Produkcji i Dystrybucji Izotopów w Świerku. Wzorce objętościowe wykonano w szczelnie zamykanych pojemnikach z pleksiglasu o wymiarach wew. 55,5 x 63,0 mm, identycznych z pojemnikami używanymi do pomiaru próbek. Do kolejnych pojemników wlewano określoną objętość roztworu wzorcowego tak, aby otrzymać wysokość słupa roztworu równą 2, 3, 4, 5, 7 i 10 mm. W ten sposób otrzymano źródła do kalibracji próbek o grubości warstwy popiołu od 2 do 10 mm. Gęstość roztworu wzorcowego w temperaturze 20 °C wyniosła 1,06 g cm⁻³.

Dla utrzymania gęstości próbek spektrometrycznych opadu całkowitego w granicach 0,9 – 1,2 g cm⁻³, bliskiej gęstości wzorców, przygotowywane próbki są prasowane specjalnym przyrządem, który jednocześnie pozwala wyznaczyć grubość warstwy popiołu.

Wyniki wydajności spektrometru dla źródła wzorcowego SRM-1, MIX-gamma z warstwą o grubości 3 mm, przedstawiono w tabeli 1.

Wyniki pomiaru wzorca kalibracyjnego.

| E [keV] | Izotop | T _{1/2} | Aktywność [Bq] | Wydajność [10 ⁻³] |
|------------|--------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| 59,5 | Am-241 | 458 lat | 65,4 | 18,9 |
| 88,5 | Cd-109 | 463 dni | 276,1 | 74,6 |
| 122,1 | Co-57 | 272 dni | 14,1 | 95,8 |
| 165,9 | Ce-139 | 137,7 dni | 10,5 | 93,4 |
| 661,7 | Cs-137 | 30 lat | 57,4 | 29,8 |
| 834,8 | Mn-54 | 312,5 dni | 69,7 | 23,4 |
| 1115,6 | Zn-65 | 243,9 dni | 120,5 | 18,4 |
| 1173,2 | Co-60 | 5,3 lat | 76,4 | 16,2 |
| 1332,5 | Co-60 | 5,3 lat | 76,4 | 14,4 |

Na podstawie zamieszczonych powyżej wyników wykreślono krzywą wydajności spektrometru i wyznaczono wydajności dla linii izotopów oznaczanych w próbkach opadu całkowitego (Tabela 2).

Przygotowanie próbki do pomiarów spektrometrycznych polega na dokładnym wymieszaniu popiołu, otrzymanego w placówkach po spopieleniu próbki miesięcznego opadu całkowitego i przeniesieniu go do pojemnika pomiarowego. Masa popiołu pojedynczych próbek, jak i zbiorczej, jest wyznaczana z dokładnością do 0,05 mg.

Wydajność detektora dla linii oznaczanych w próbkach.

| E [keV] | Izotop | Wydajność [10 ⁻³] |
|------------|--------|----------------------------------|
| 186 | Ra-226 | 88 |
| 447 | Be-7 | 34 |
| 662 | Cs-137 | 30 |
| 796 | Cs-134 | 25 |
| 911 | Ra-228 | 23 |
| 1460 | K-40 | 14 |

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:

$$A_i = \frac{N_i}{F(E) * p_i * t_p} \quad (1)$$

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

F(E) – wydajność detektora dla fotonów o energii E,

p_i – liczba fotonów o energii E, przypadająca na jeden rozpad i-tego radionuklidu,

t_p - 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. Niezbędna ilość impulsów w pikie, dla jego wydzielenia z tła jest określana, jako dolna granica detekcji i oznaczana LLD.

Stosuje się różne metody obliczania tej wielkości. W naszych obliczeniach posłużono się metodą Loyda A. Currie'go określoną wzorem:

$$LLD = 0,276 + 1,05 * \sigma \quad (2)$$

gdzie : LLD – 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.

Minimalną mierzalną aktywność dla danego toru spektrometrycznego określa zależność:

$$A_d = \frac{LLD * C}{F(E) * p * t_p} \quad (3)$$

$$C = \frac{t_p * \lambda}{1 - e^{-\lambda * t_p}} \quad (4)$$

gdzie: A_d – minimalna mierzalna aktywność w Bq,

t_p – czas pomiaru w sekundach,

λ -- stała rozpadu [s^{-1}]

p – wydajność kwantowa.

Aktywność właściwą poszczególnych radionuklidów wyznaczano na podstawie zależności:

$$S_i = \frac{A_i}{b * W * k} \exp(\lambda_i * t_2) \quad (5)$$

Gdzie: A_i – aktywność i-tego izotopu w próbce,

λ_i – stała rozpadu,

t_2 – czas trwania przerwy między zakończeniem ekspozycji próbki a rozpoczęciem pomiaru,

b – część masy próbki zbiorczej wziętej do analizy,

W – powierzchnia naczynia do zbierania opadu całkowitego (1500 cm^2),

k – liczba próbek wziętych do analizy.

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

Radiochemiczne oznaczanie ^{90}Sr w miesięcznym opadzie całkowitym

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

ETAP I – Chemiczne oczyszczanie próbki

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

Próbkę opadu miesięcznego o znanej masie umieszcza się w zlewce, zwilża wodą destylowaną i

dodaje ok. 200 ml kwasu azotowego HNO₃ (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 przesącza dodaje się 100 ml 8% kwasu szczawiowego, 1 ml nośnika strontu, kilka kropli zieleni bromokrezolowej i stężony amoniak do uzyskania pH 4-4,5 (kolor ciemnozielony). Roztwór ogrzewa się do temp. 80°C w celu całkowitego wytrącenia osadu. Po opadnięciu osadu roztwór dekantuje się z nad osadu szczawianów.

- Osad szczawianów rozpuszcza się w roztworze (1:1) HNO₃ (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. Spopielanie osadu.

Sączek z osadem przenosi się do tygla i spala w piecu muflowym w temperaturze 650 – 700 °C. Następnie tygiel wyjmuje się z pieca i studzi.

4. Rozpuszczanie popiołu.

Osad w tyglu zwilża się wodą destylowaną, dodaje kilka mililitrów HNO₃ (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 HNO₃ (1:1) do uzyskania pH 2-3 i 1 ml nośnika itru. Tak przygotowaną próbę pozostawia się przez 18 dni.

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

7. Wytrącanie wodorotlenku itru.

Po 18 dniach roztwór z butelki przenosi się do zlewki i zagęszcza przez odparowanie do objętości ok. 50 ml. Następnie dodaje się stężony amoniak do uzyskania pH 8 i podgrzewa do wytrącenia wodorotlenku itru. Osad oddziela się od roztworu przez sączenie. Roztwór zlewa się do butelki, jego pH doprowadza się, za pomocą HNO₃, do wartości 2 - 3 oraz dodaje 1 ml nośnika itru. Tak przygotowany roztwór, pozostawiony na 18 dni, umożliwia powtórne przeprowadzenie analizy oraz kontrolę poprawności oznaczeń.

8. Wytrącanie szczawianów itru.

Osad wodorotlenku itru rozpuszcza się w kilku mililitrach HNO₃ (1:1). Następnie dodajemy ok. 25 ml wody destylowanej, 15 – 20 kropli nasyconego roztworu kwasu szczawiowego 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 FHT 770T, który umożliwia równoległy pomiar 6 próbek. Czas pomiaru próbek minimum 2 godz. Przed każdym pomiarem mierzone jest tło, które nie przekracza wartości 0,6 imp/min. Kalibrację aparatury pomiarowej przeprowadza się z użyciem preparatu wzorcowego ^{90}Y o znanej aktywności i geometrii identycznej z geometrią próbek.

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

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

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 [m²]

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 :

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

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:

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

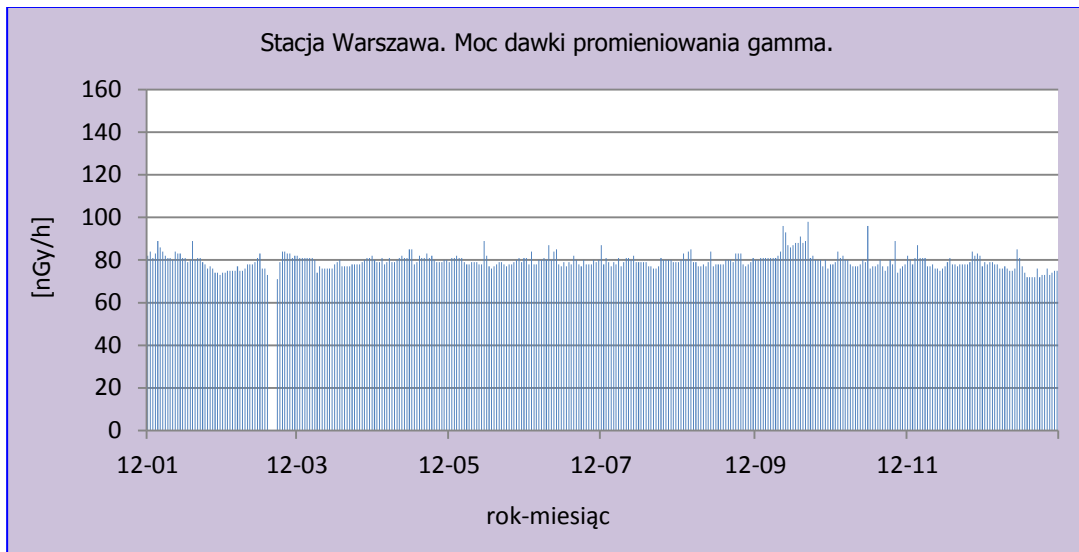
σ - błąd pomiaru [Bq m⁻²]

t_p – czas pomiaru próby [min]

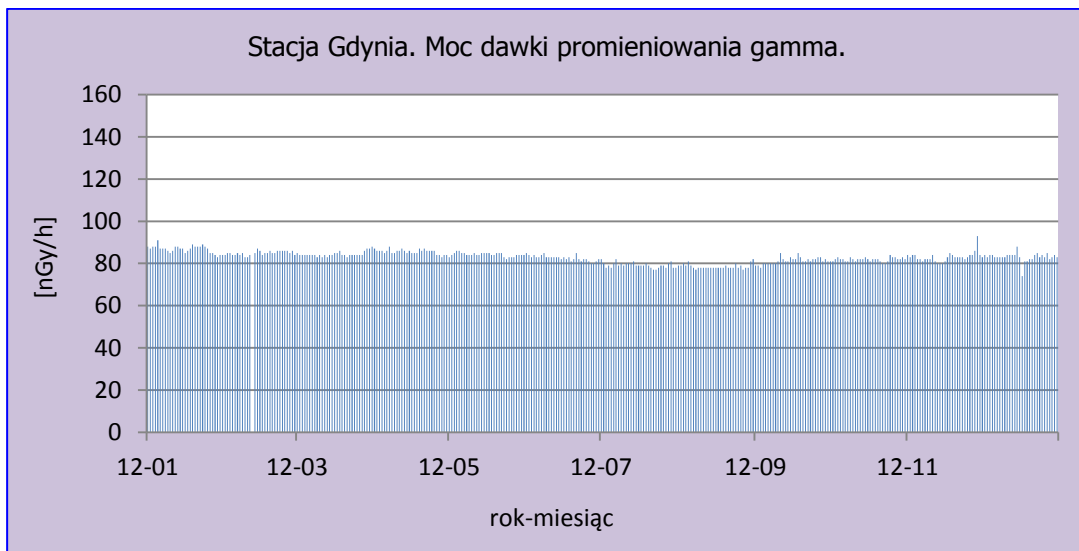
t_{pt} – czas pomiaru tła [min]

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

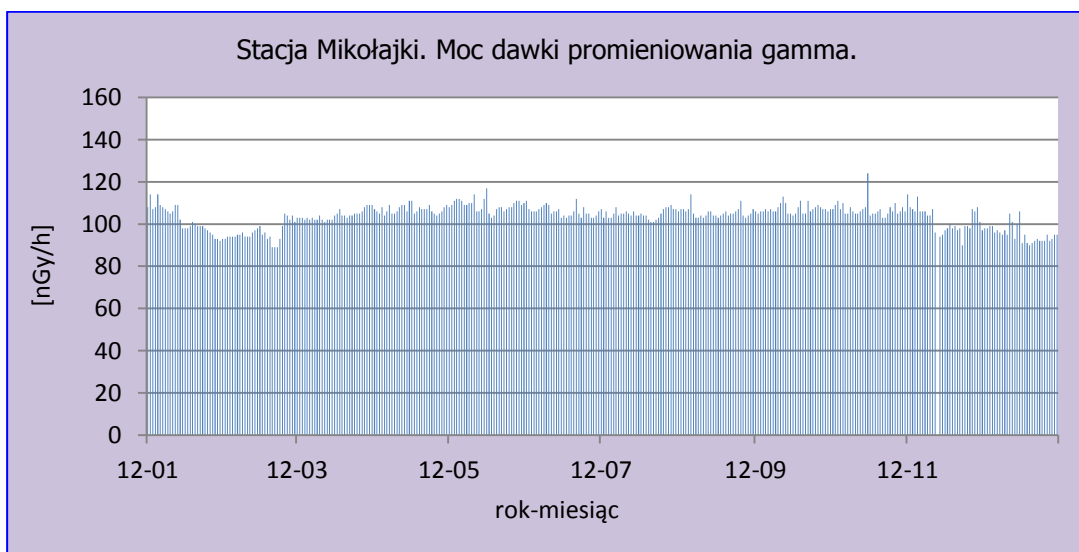
3. Wyniki i omówienie wyników.



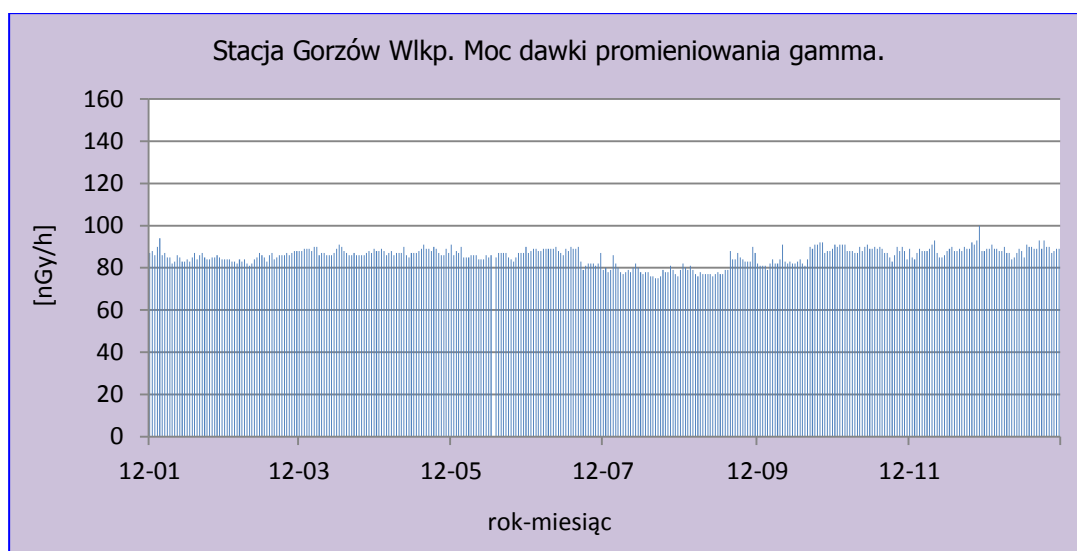
Rys. 2. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Warszawa w 2012 roku.



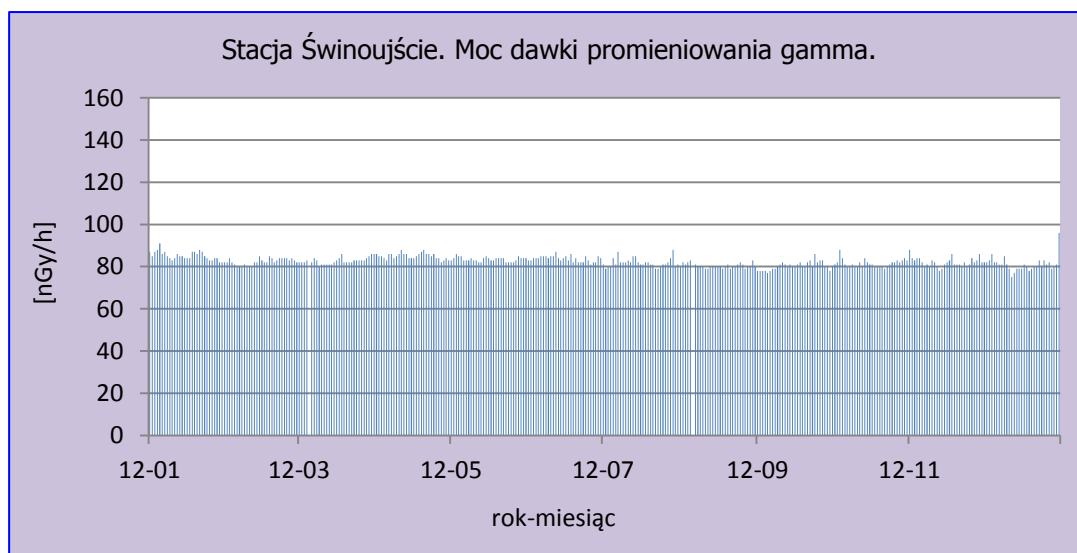
Rys. 3. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gdynia w 2012 roku.



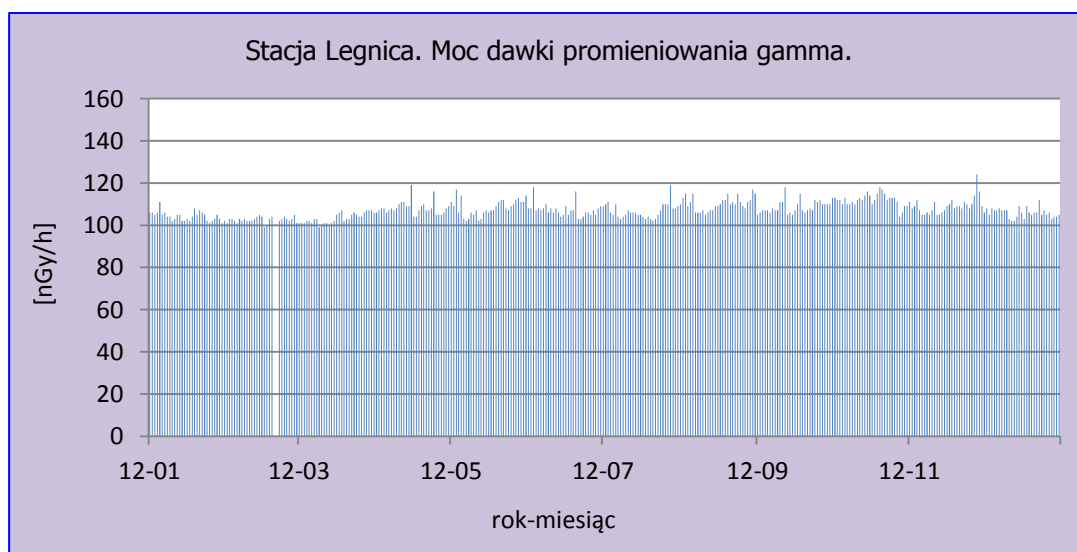
Rys. 4. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Mikołajki w 2012 roku.



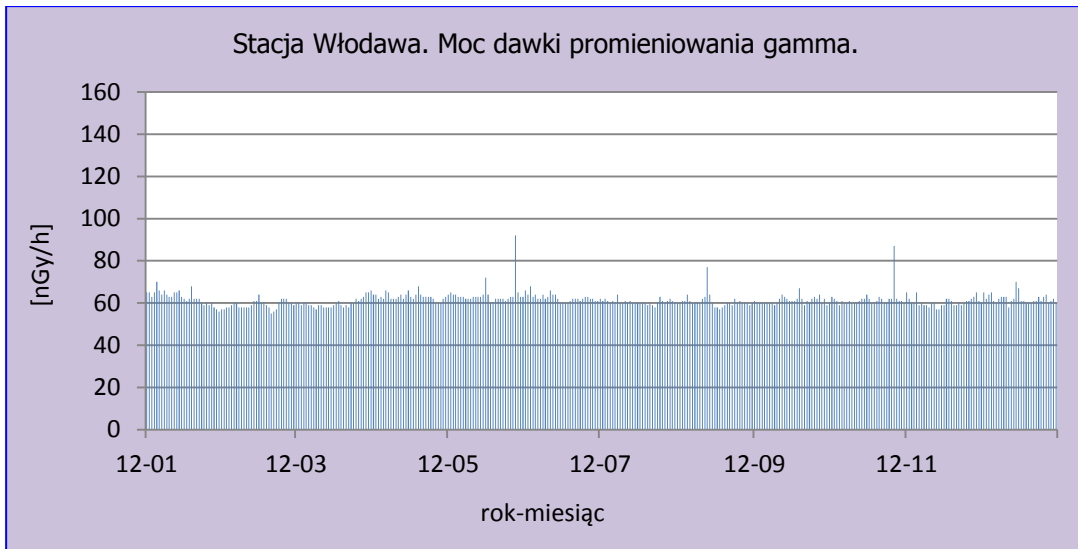
Rys. 5. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Gorzów Wlkp. w 2012 roku.



Rys. 6. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Świnoujście w 2012 roku.



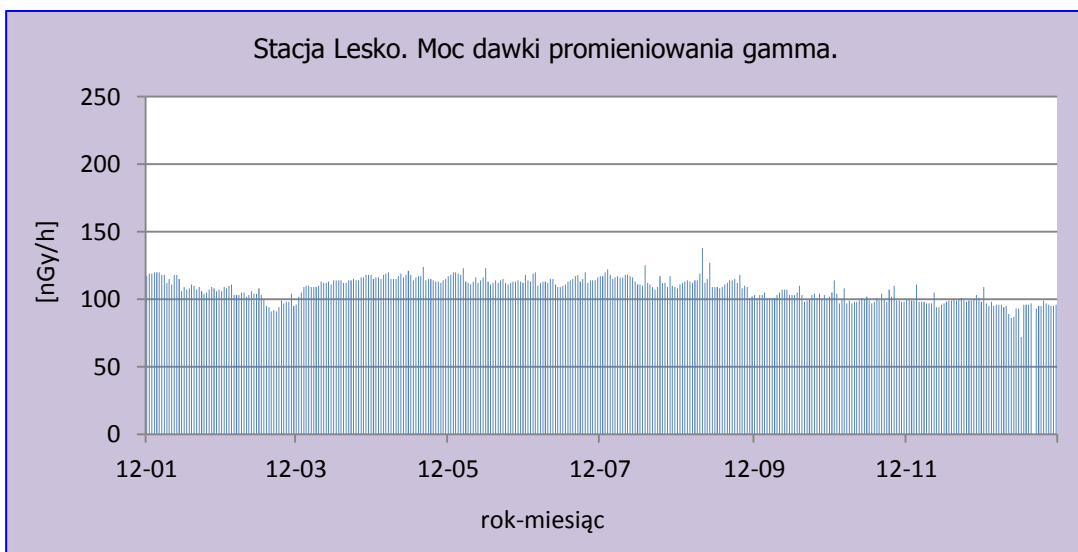
Rys. 7. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Legnica w 2012 roku.



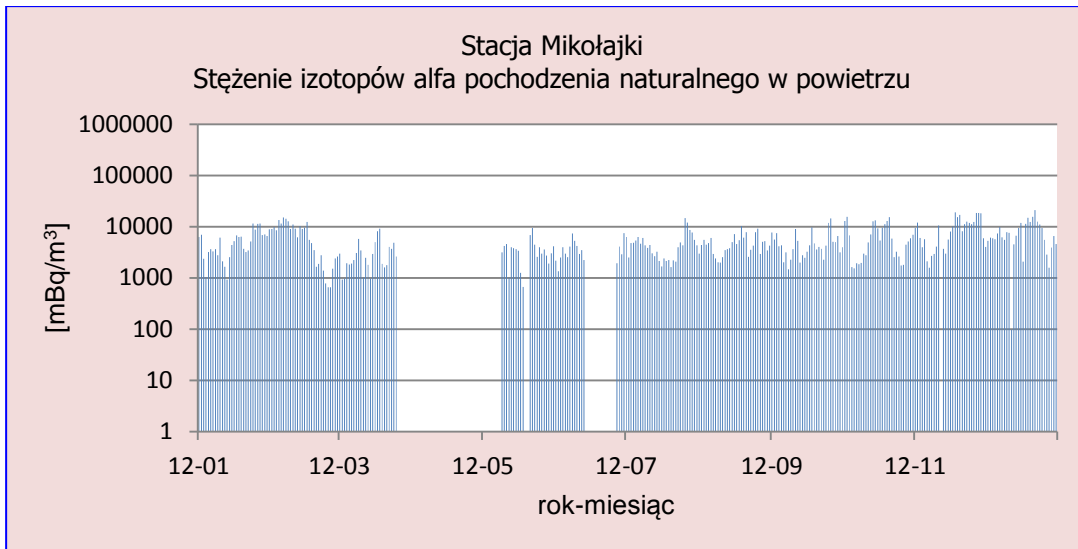
Rys. 8. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Włodawa w 2012 roku.



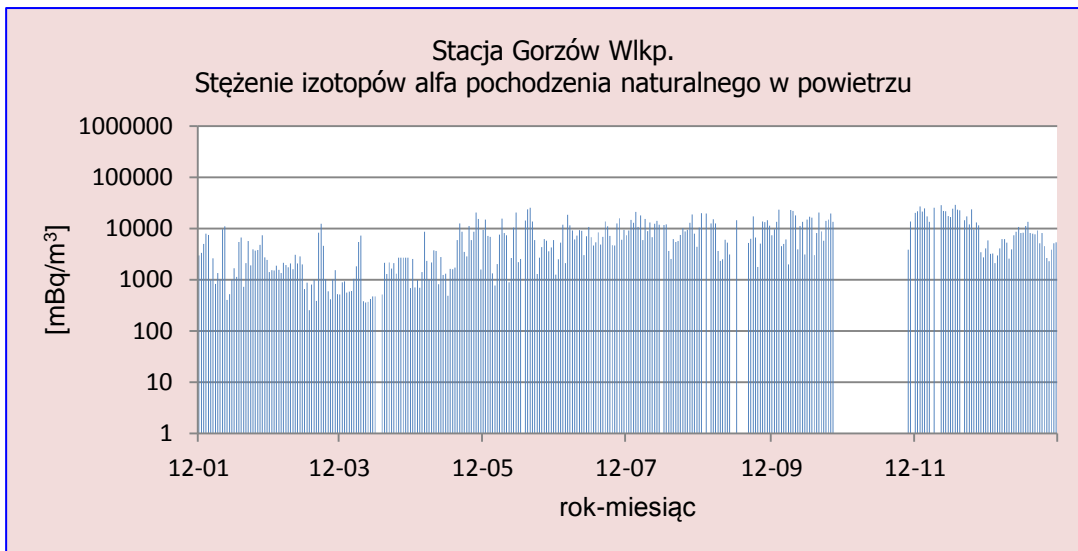
Rys. 9. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Zakopane w 2012 roku.



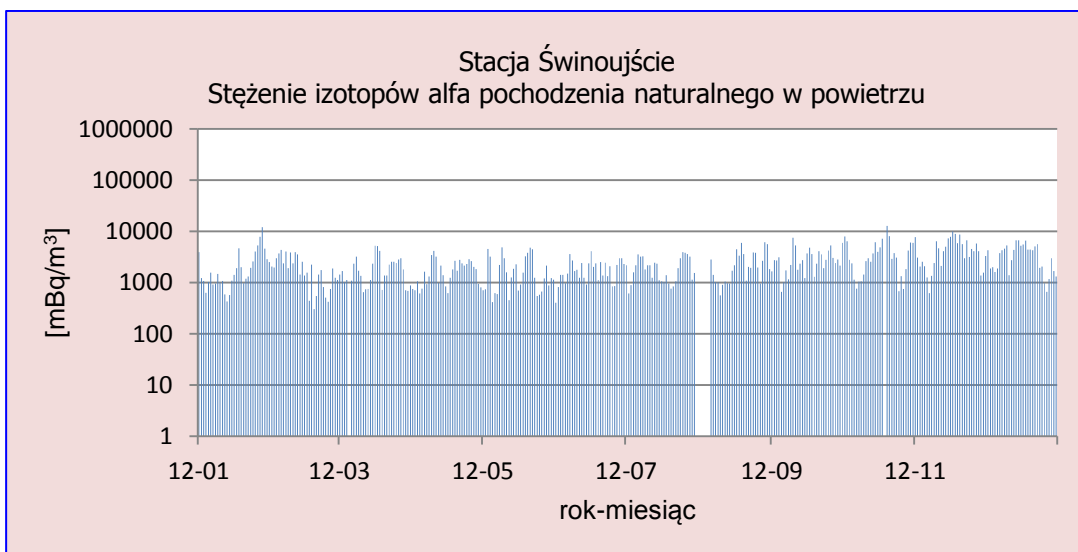
Rys. 10. Moc dawki promieniowania gamma na stacji Lesko w 2012 roku.



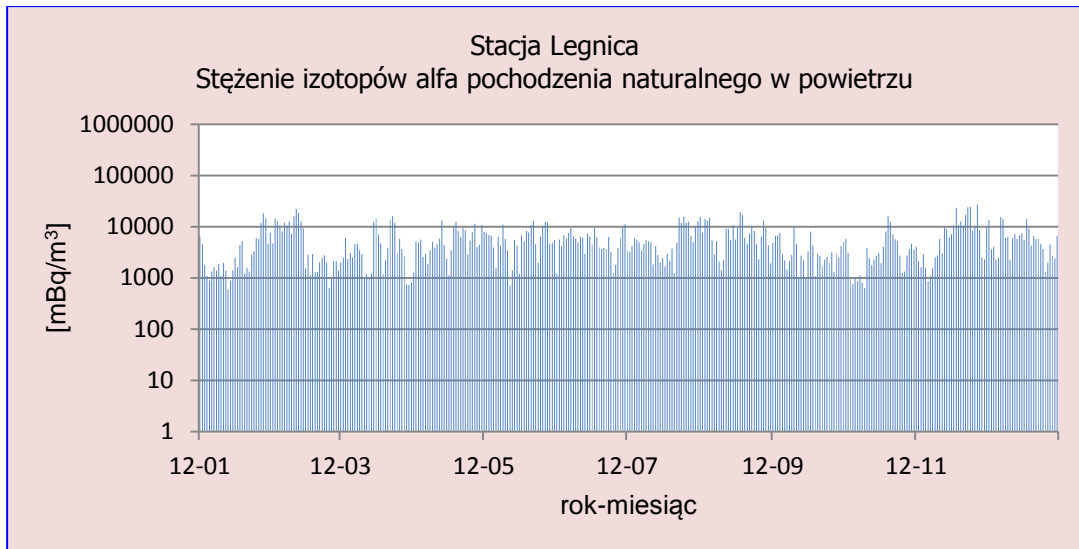
Rys.11. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Mikołajki.



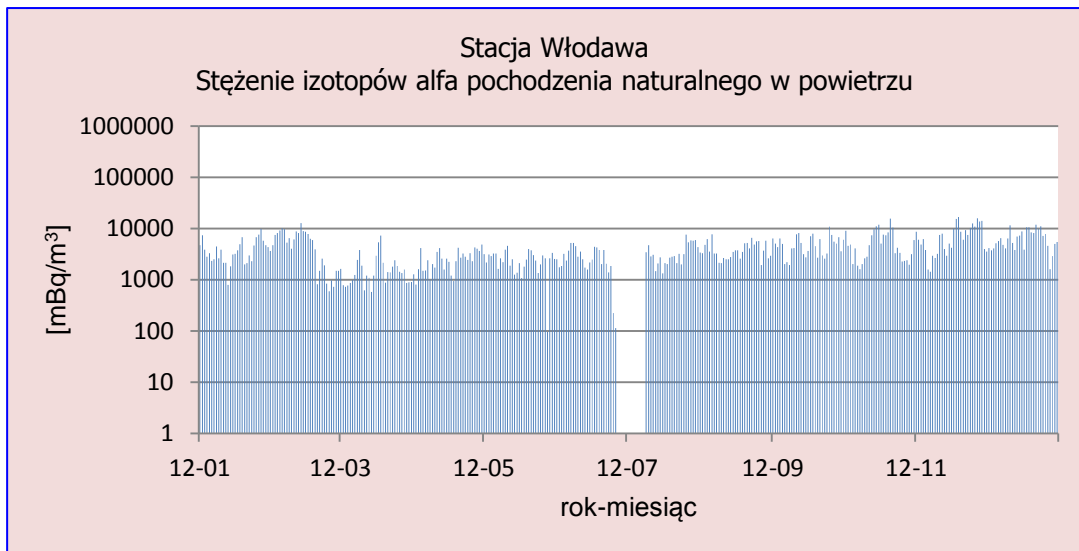
Rys.12 Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Gorzów Wlkp.



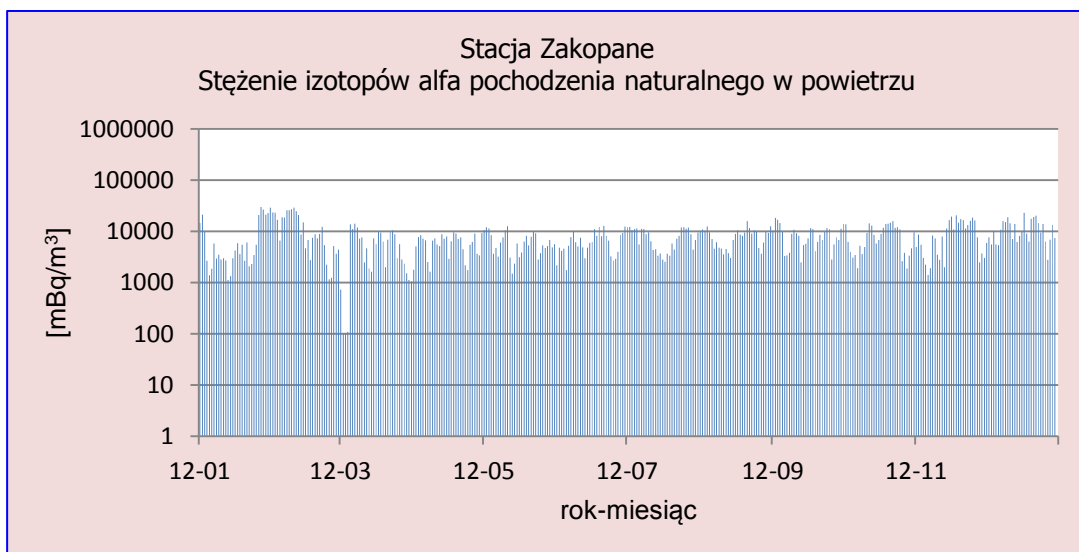
Rys.13. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Świnoujście.



Rys.14. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Legnica.



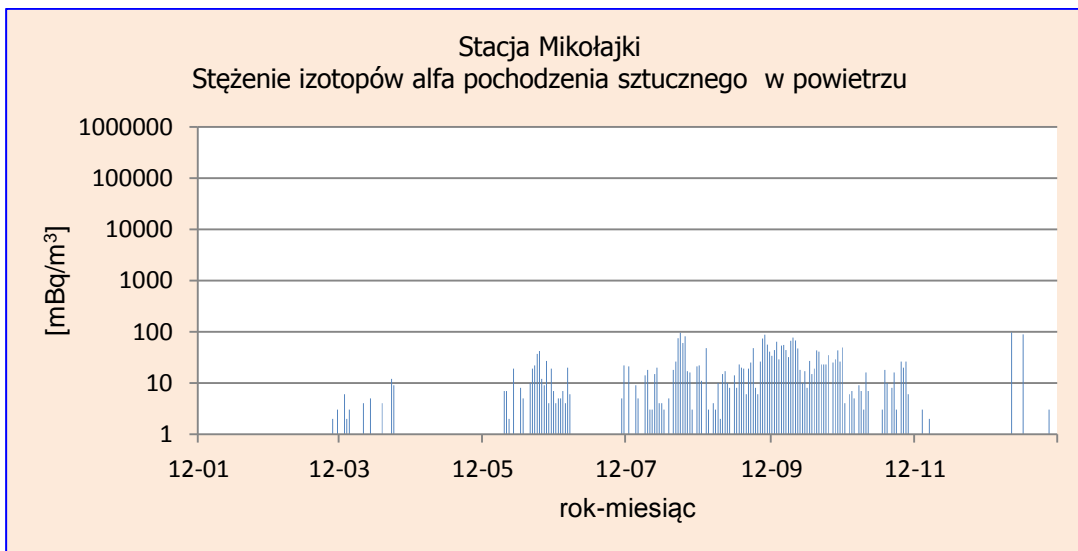
Rys.15. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Włodawa.



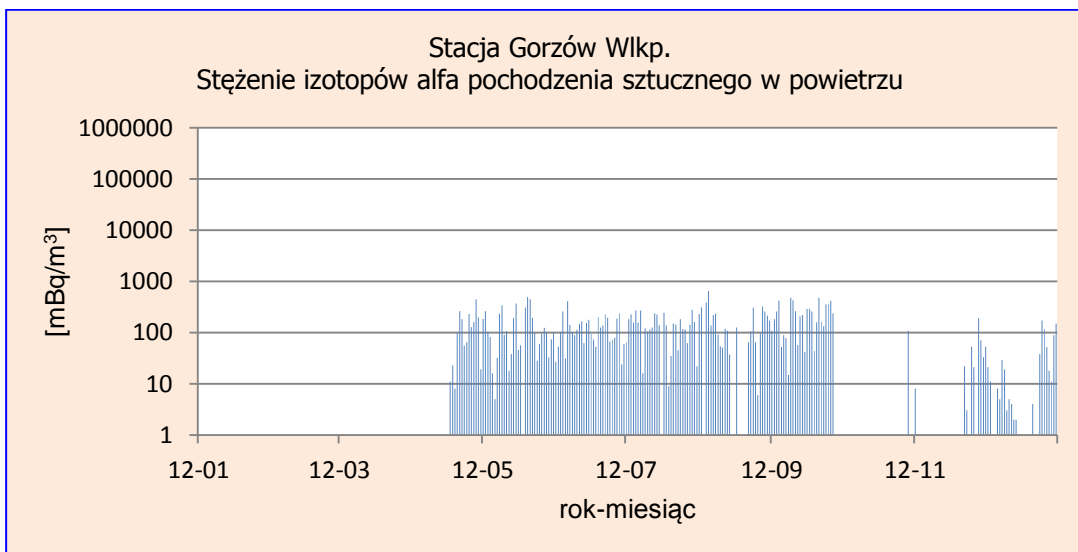
Rys.16. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach na stacji Zakopane.



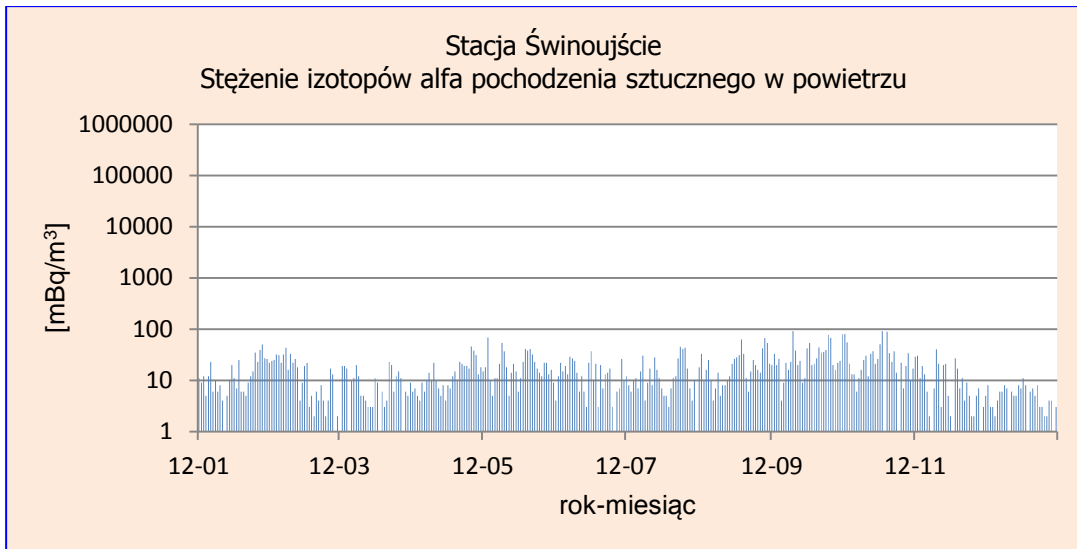
Rys.17. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolu na stacji Lesko.



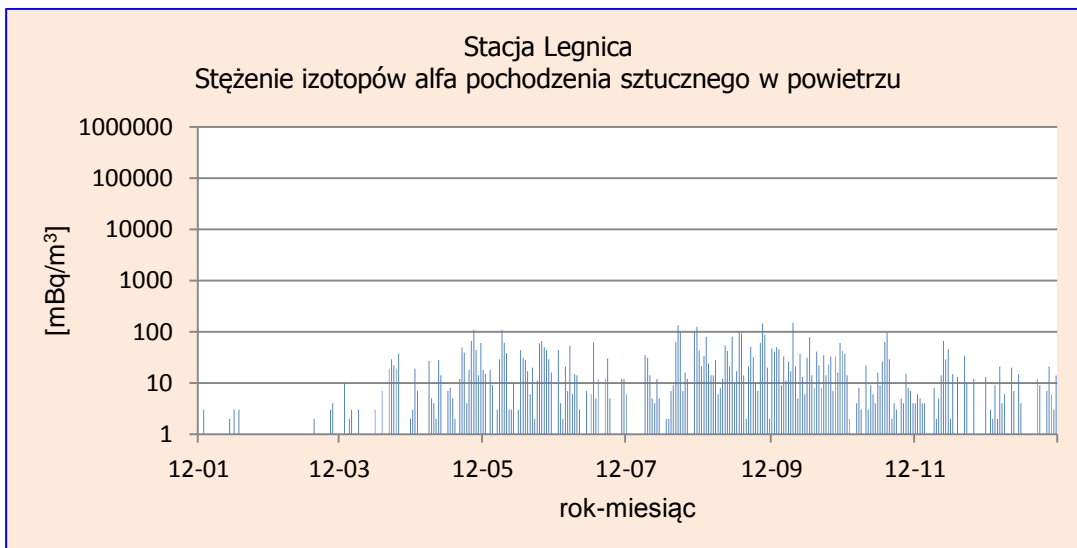
Rys.18. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Mikołajki.



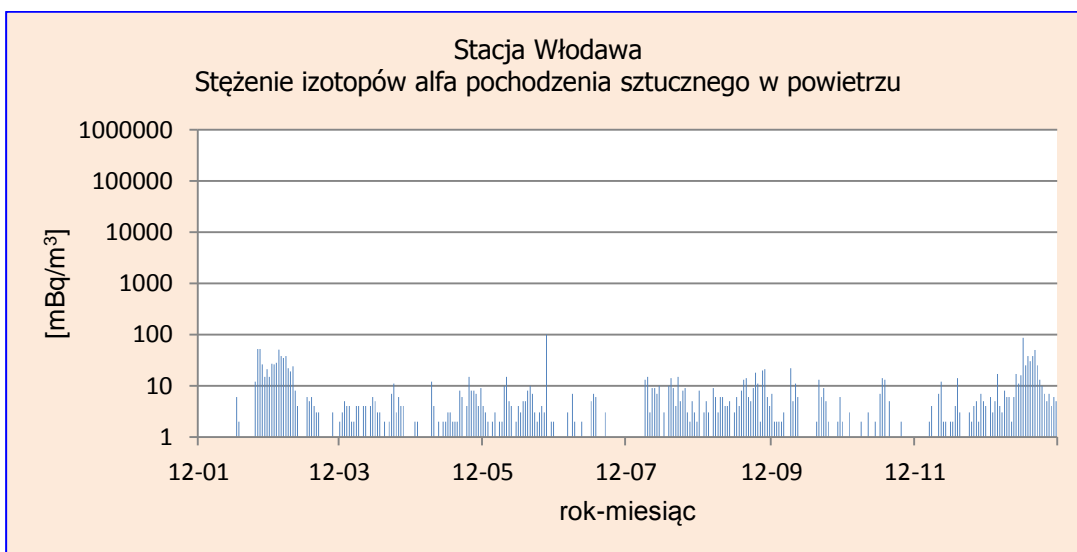
Rys.19. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp.



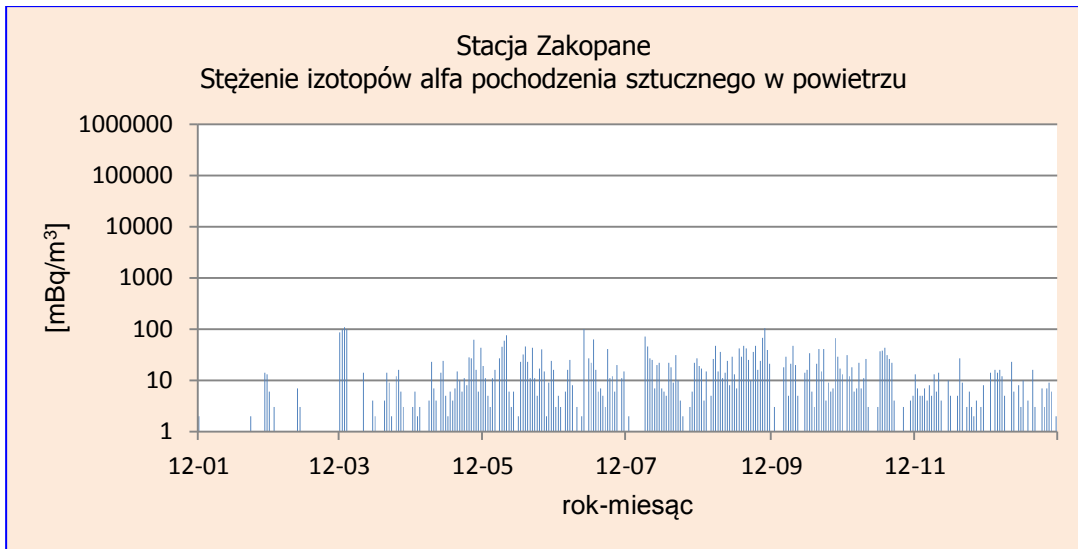
Rys.20. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Świnoujście.



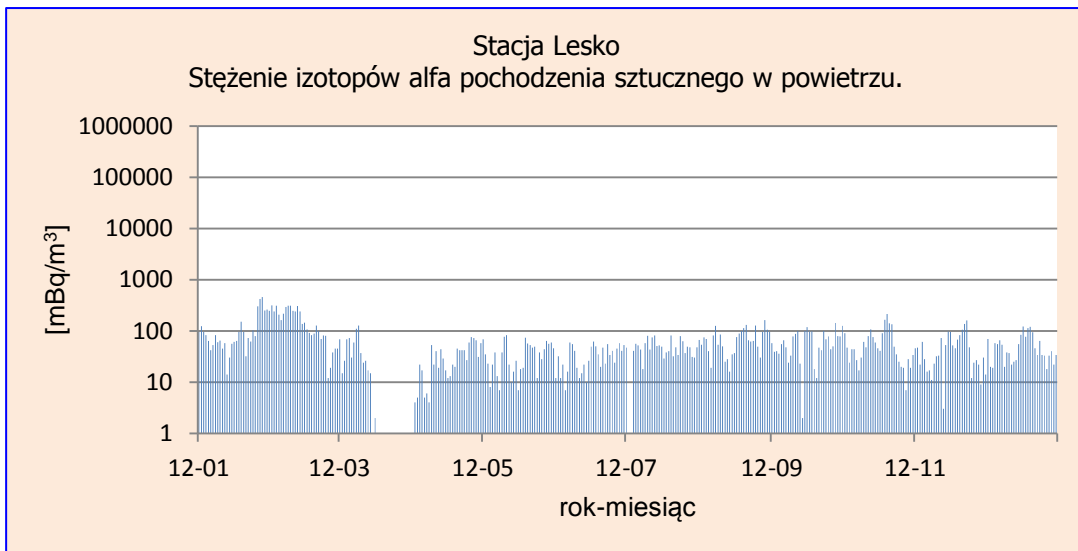
Rys.21. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Legnica.



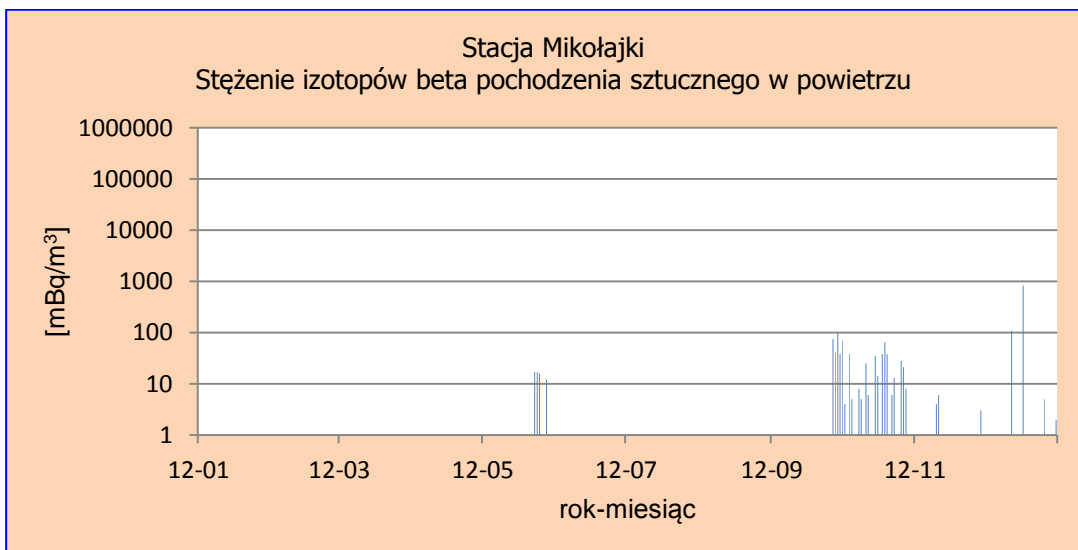
Rys.22. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Włodawa.



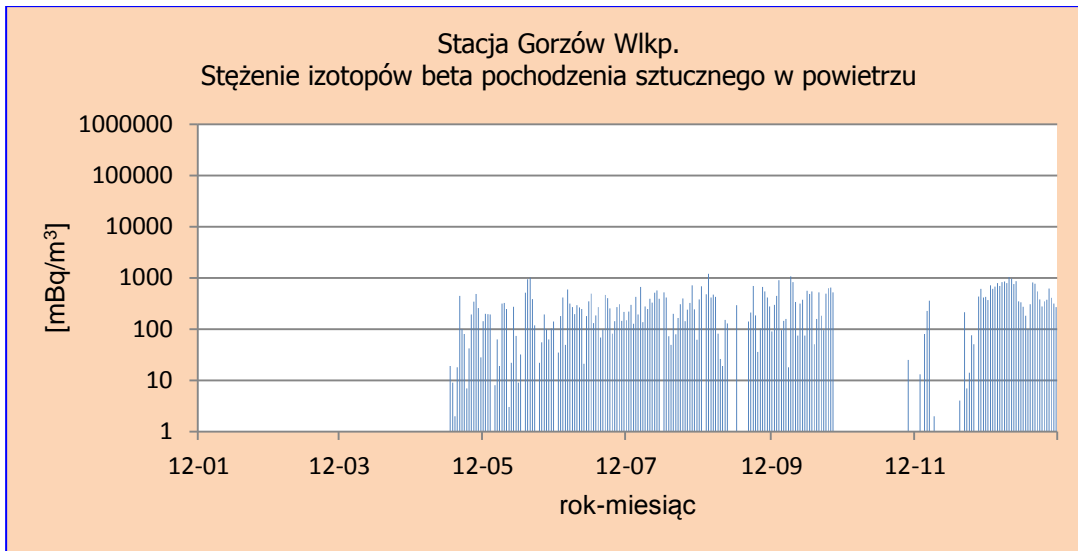
Rys.23. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Zakopane.



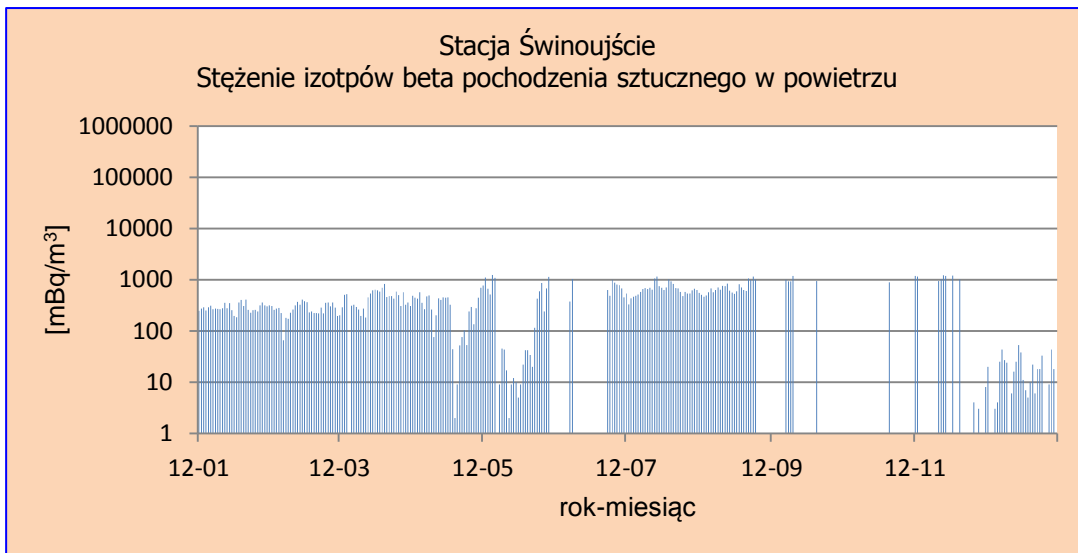
Rys.24. Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko.



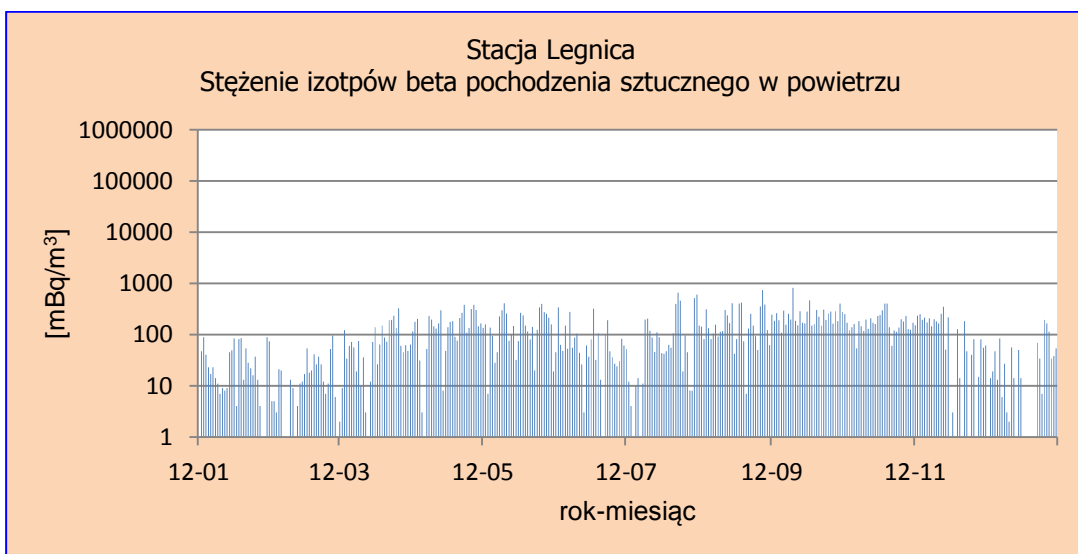
Rys.25. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Mikołajki.



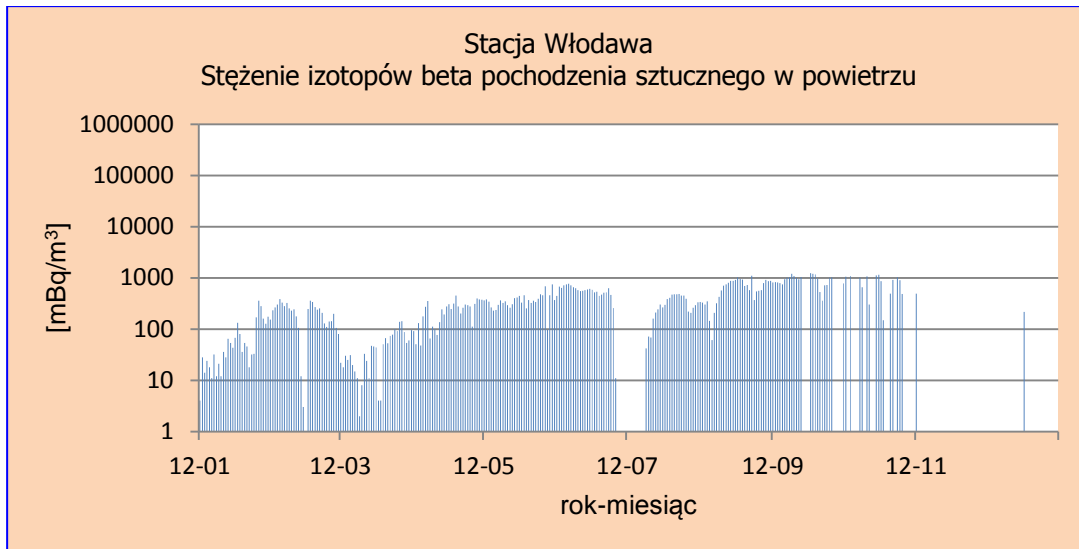
Rys.26 Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Gorzów Wlkp.



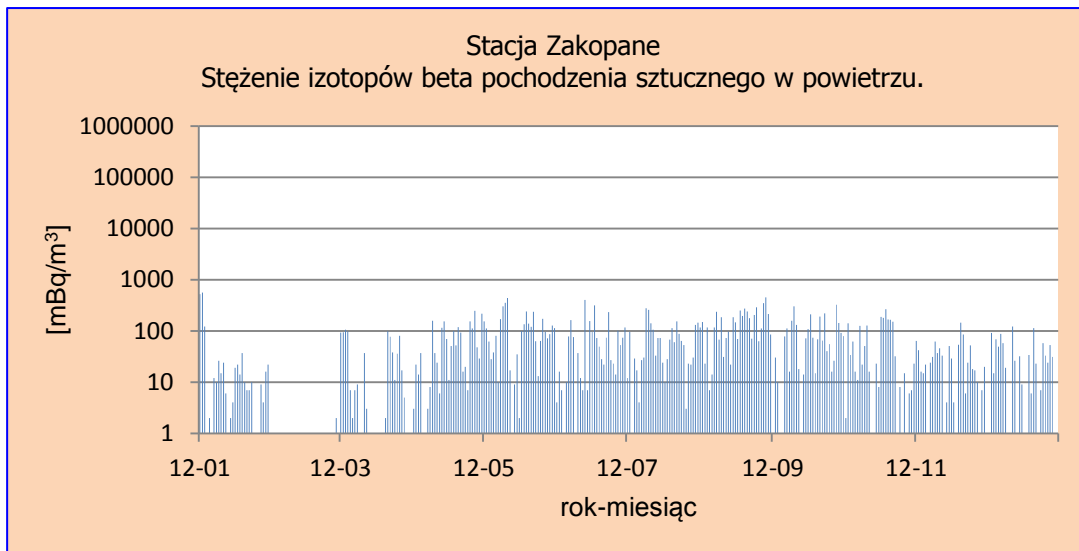
Rys.27. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Świnoujście.



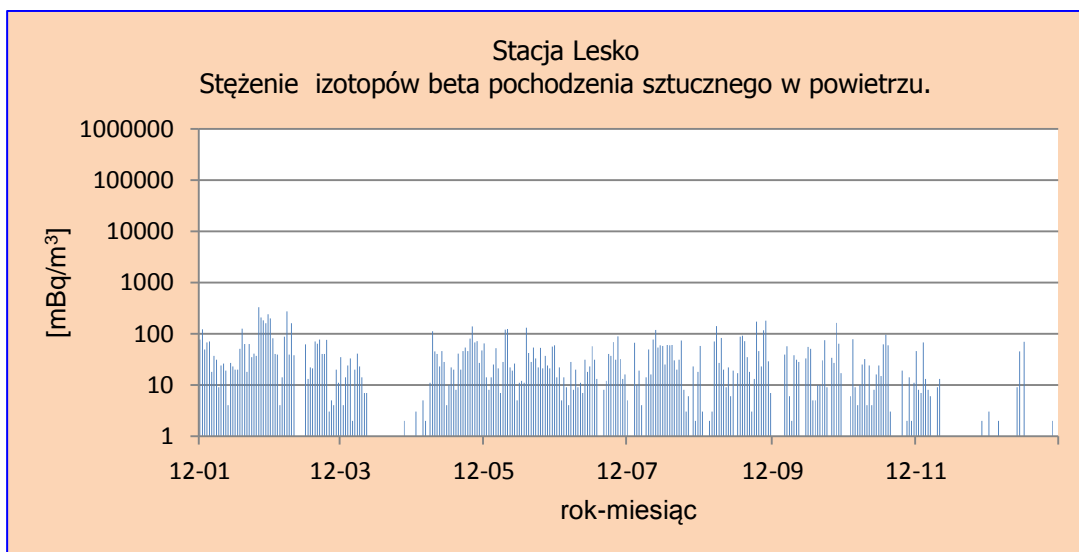
Rys.28. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Legnica.



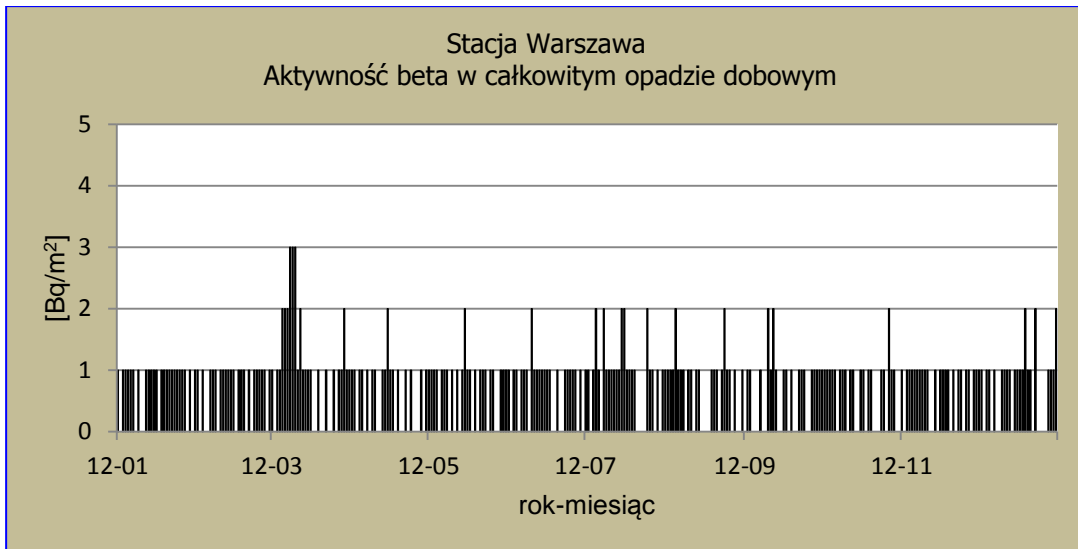
Rys.29. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Włodawa.



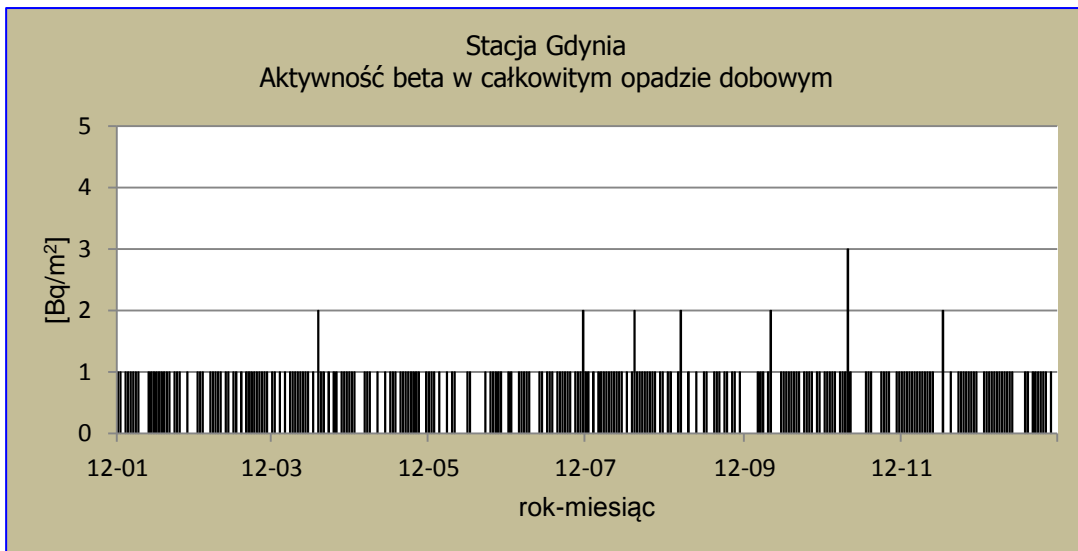
Rys.30. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Zakopane.



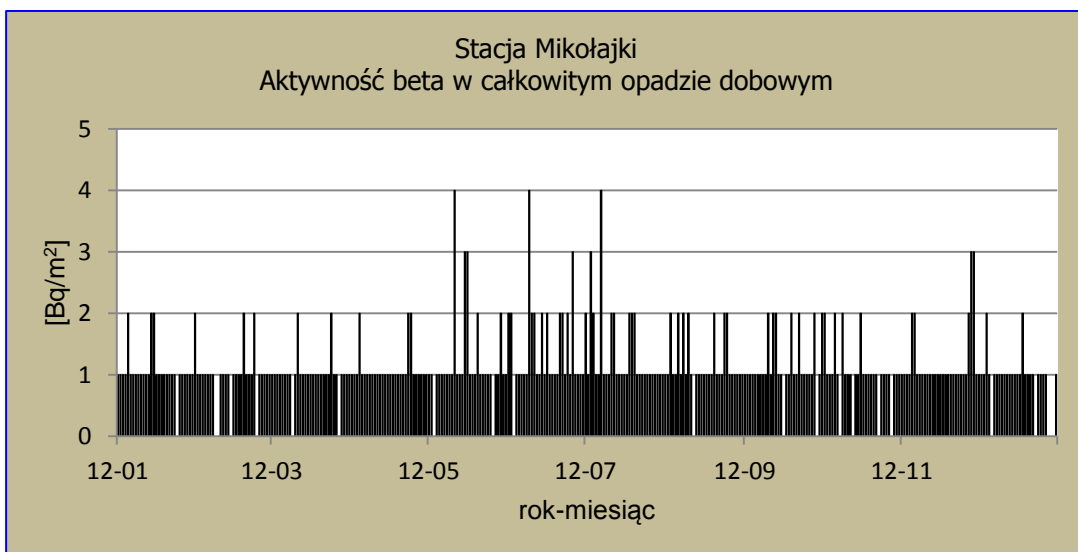
Rys.31. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolu na stacji Lesko.



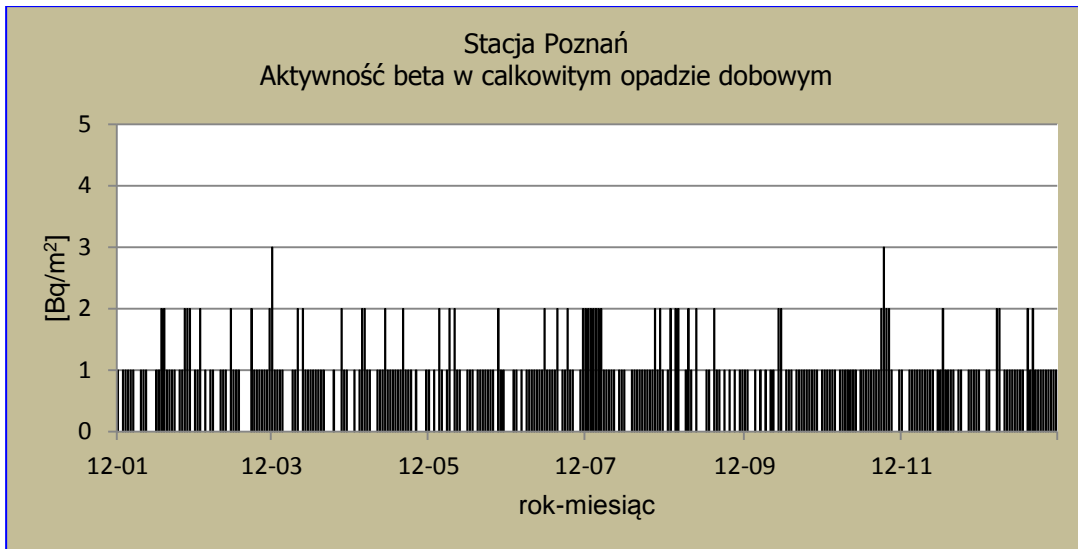
Rys.32. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Warszawa.



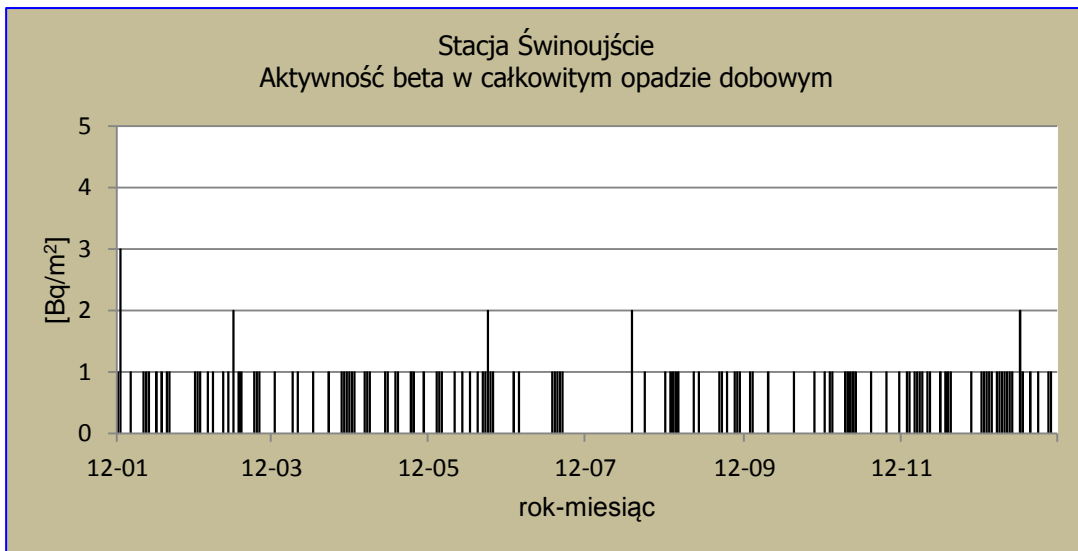
Rys.33. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Gdynia.



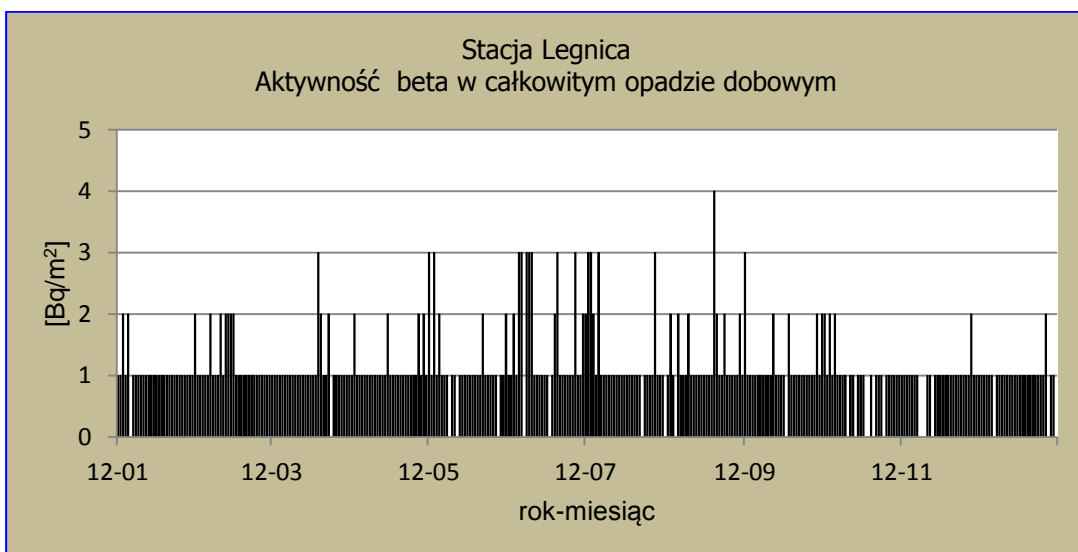
Rys.34. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Mikołajki.



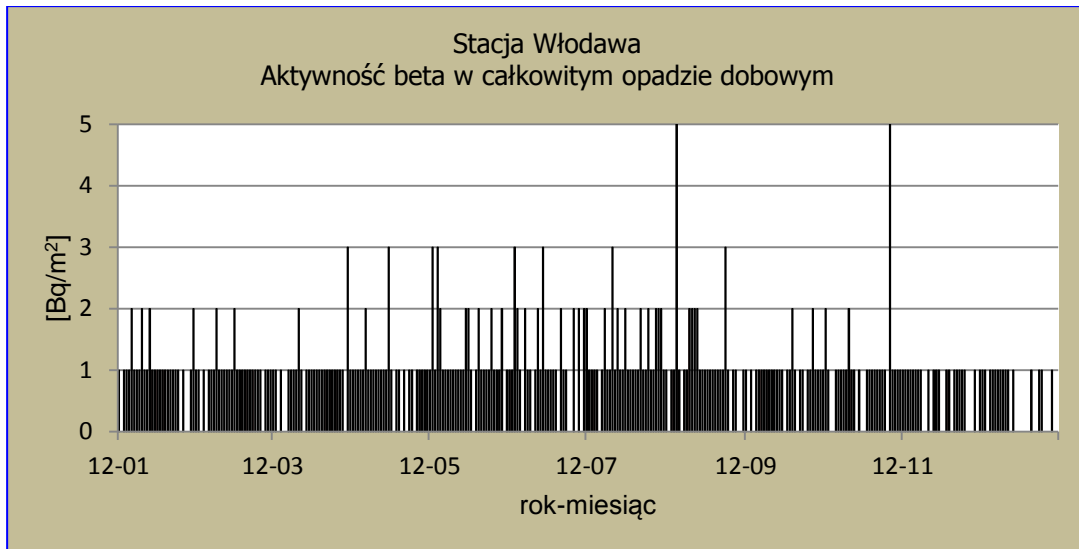
Rys.35. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Poznań.



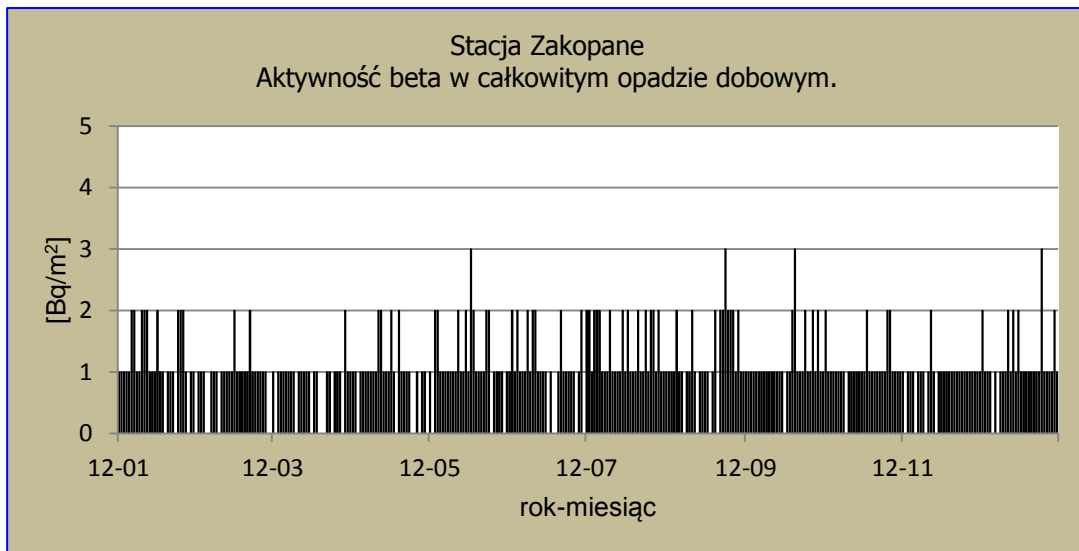
Rys.36. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Świnoujście.



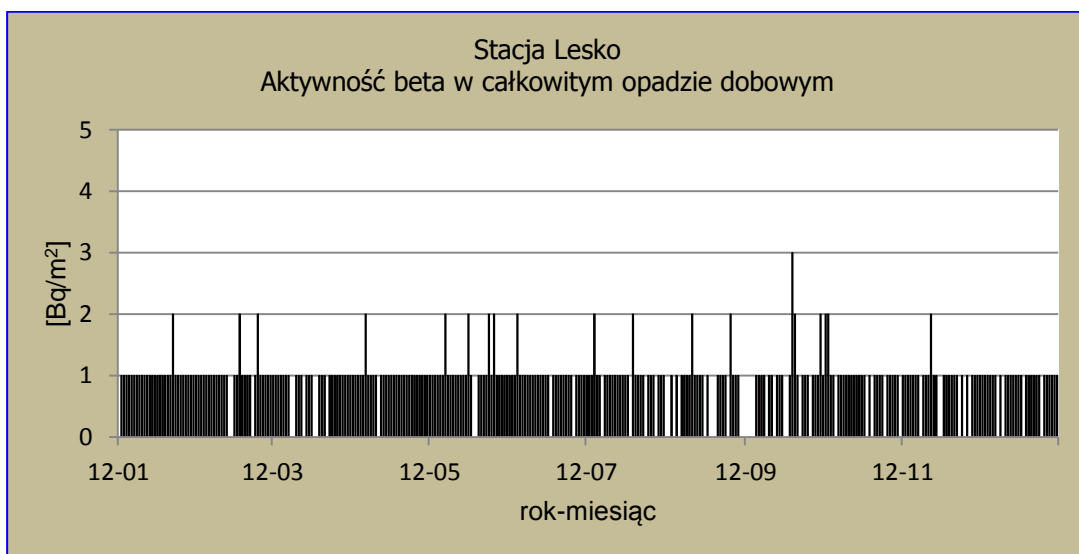
Rys.37. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dobowym na stacji Legnica.



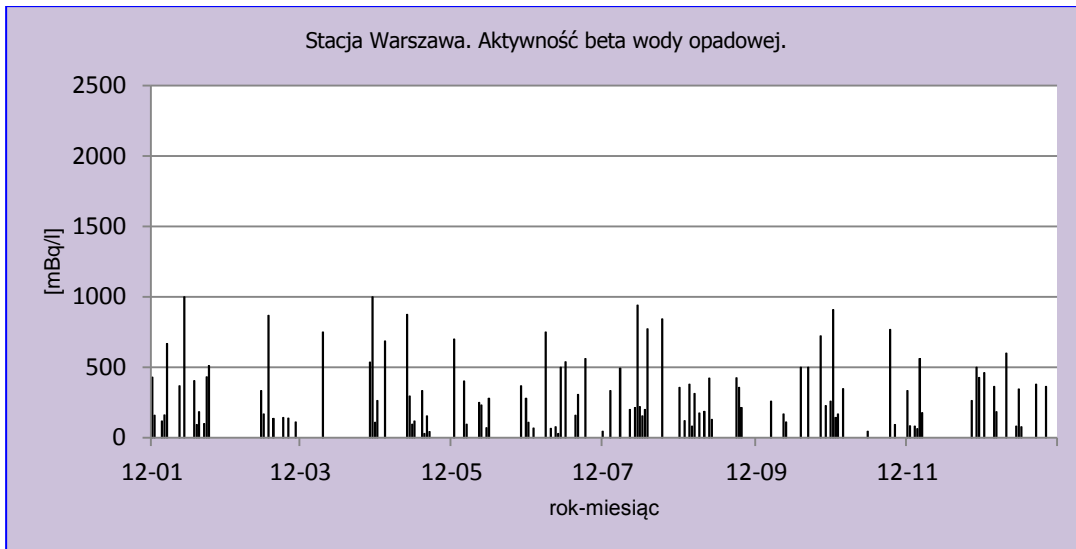
Rys.38. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Włodawa.



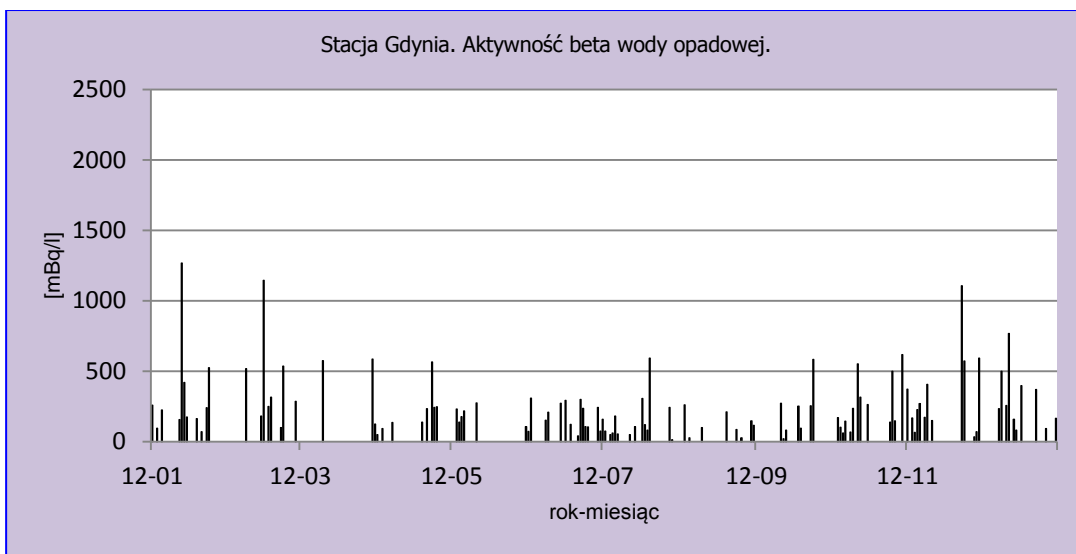
Rys.39. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Zakopane.



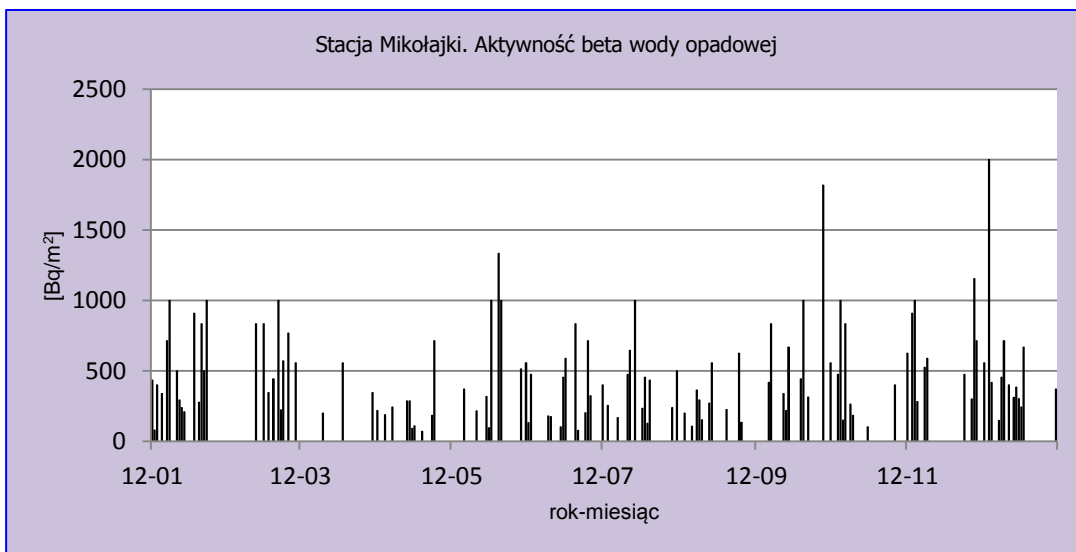
Rys.40. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie dziennym na stacji Lesko.



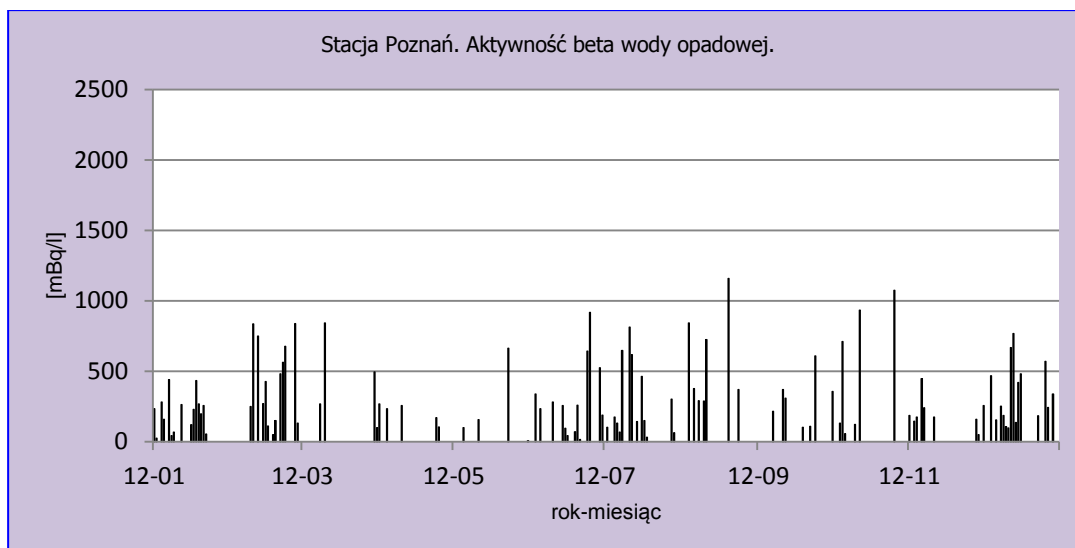
Rys.41. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Warszawa.



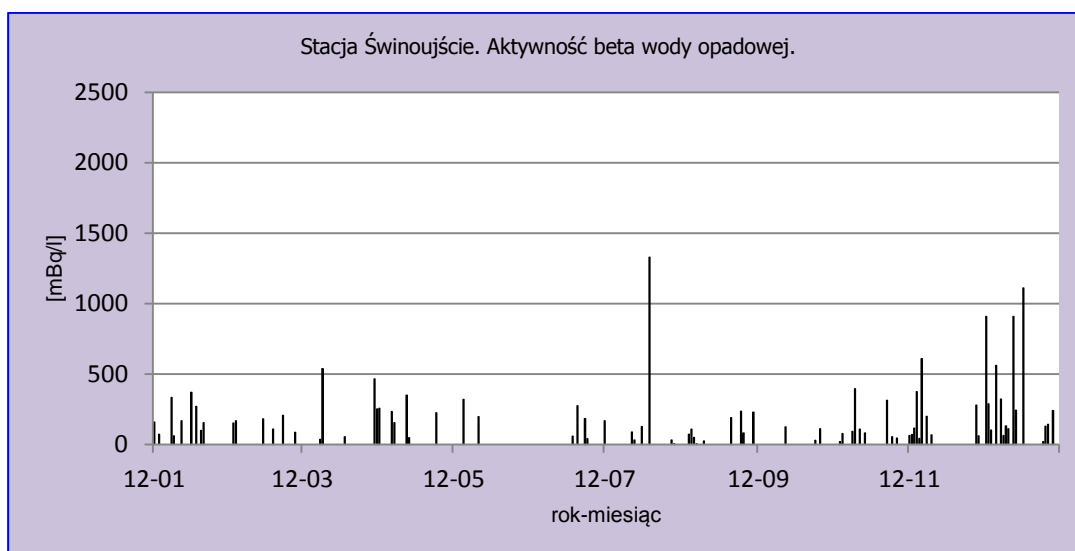
Rys.42. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Gdynia.



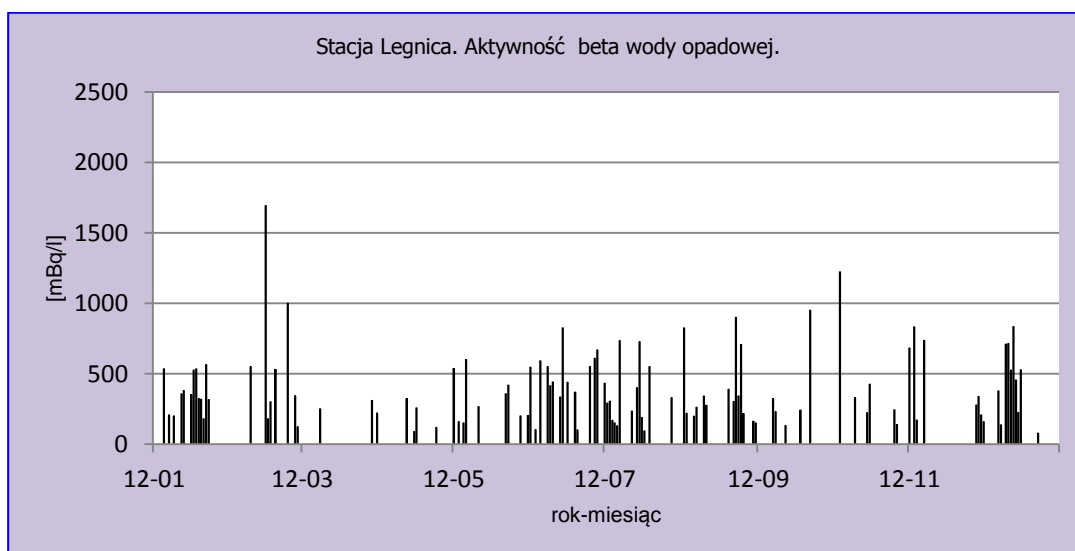
Rys.43. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Mikołajki.



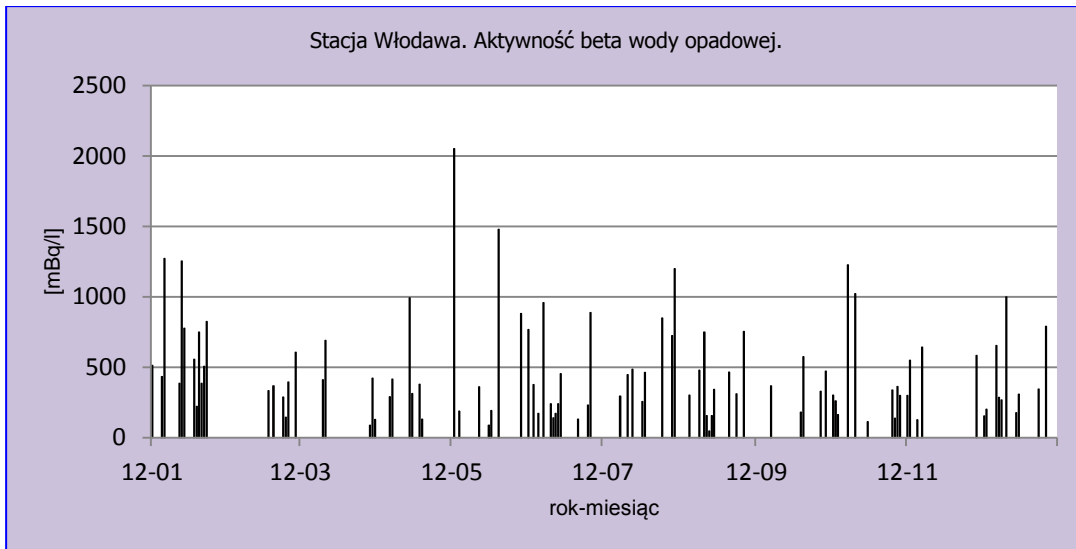
Rys.44. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Poznań.



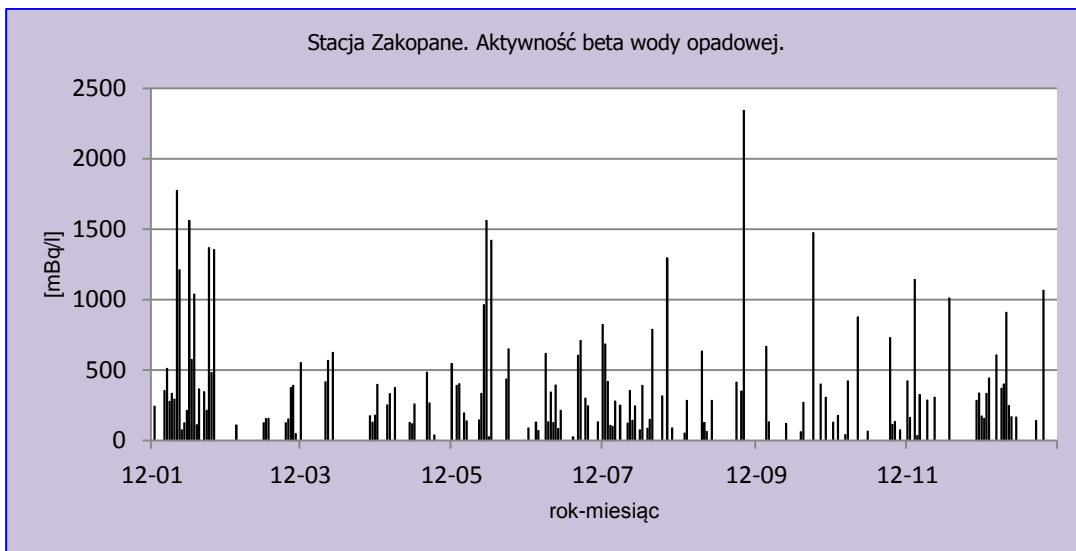
Rys.45. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Świnoujście.



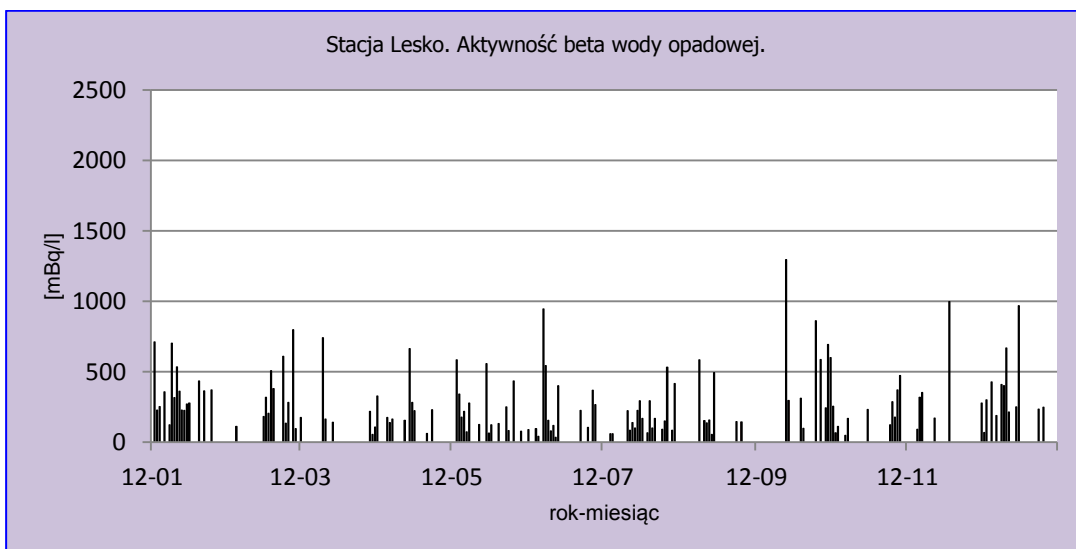
Rys.46. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Legnica.



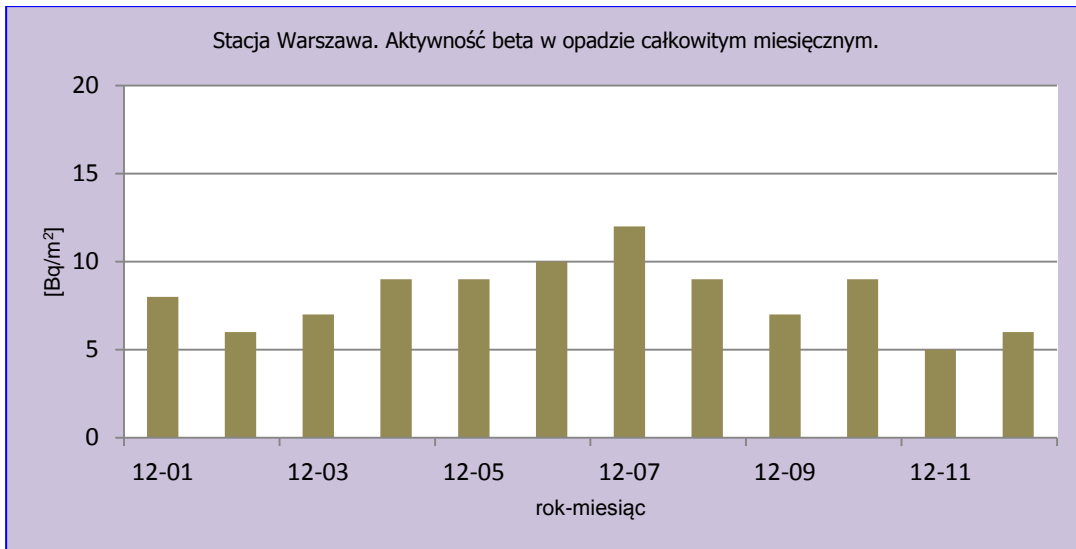
Rys.47. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Włodawa.



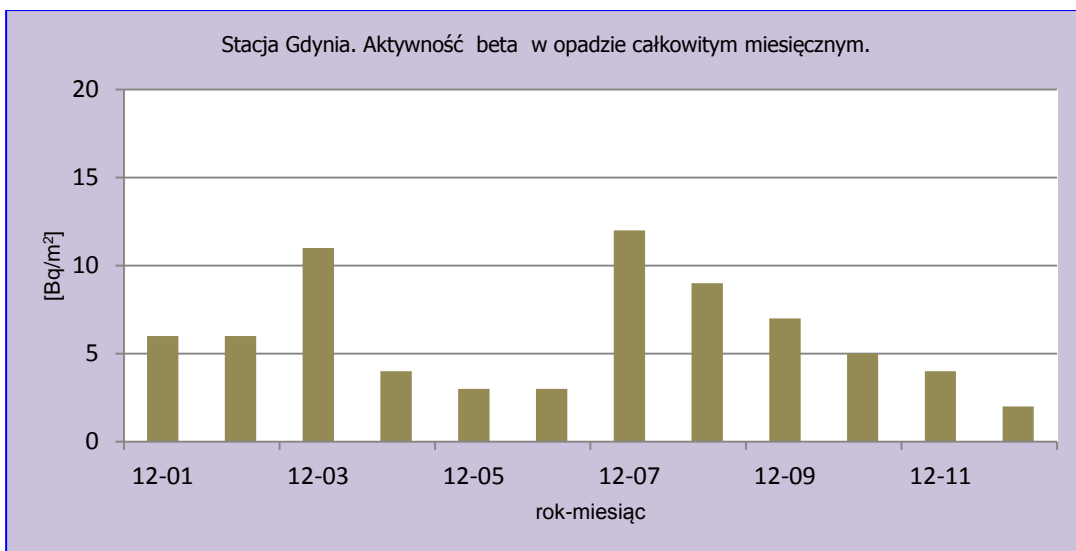
Rys.48. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Zakopane.



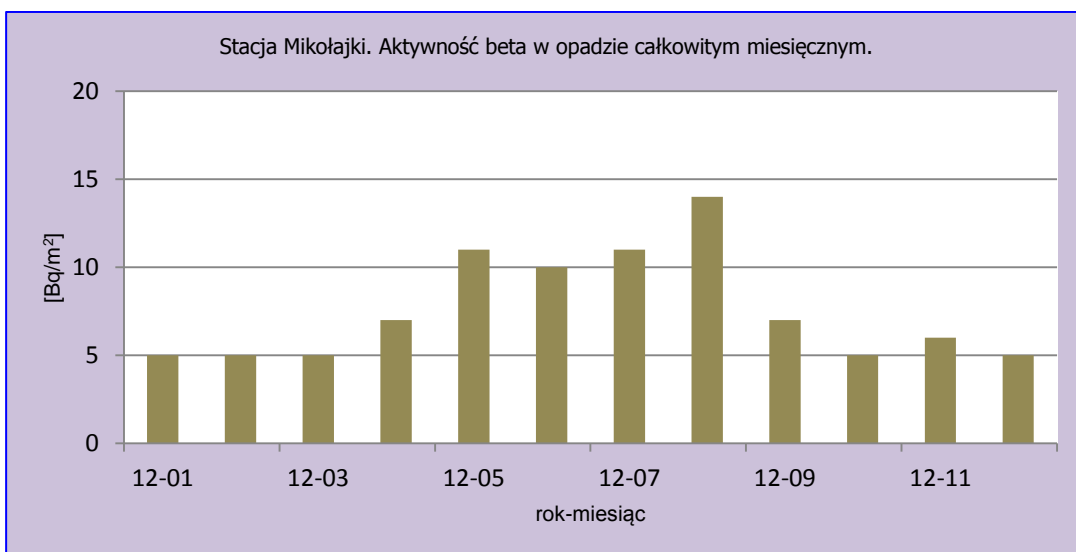
Rys.49. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w wodzie opadowej na stacji Lesko.



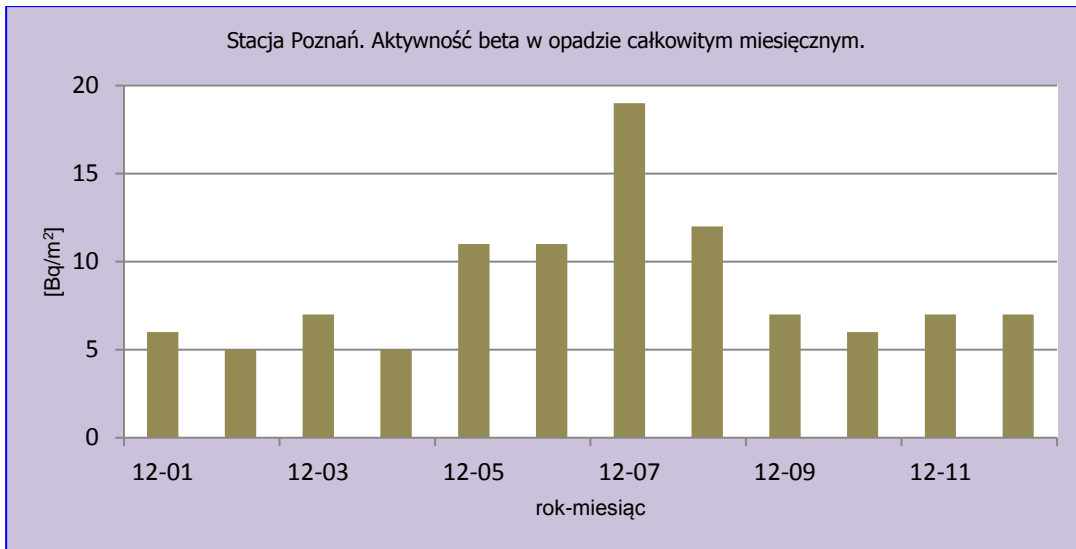
Rys.50. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Warszawa.



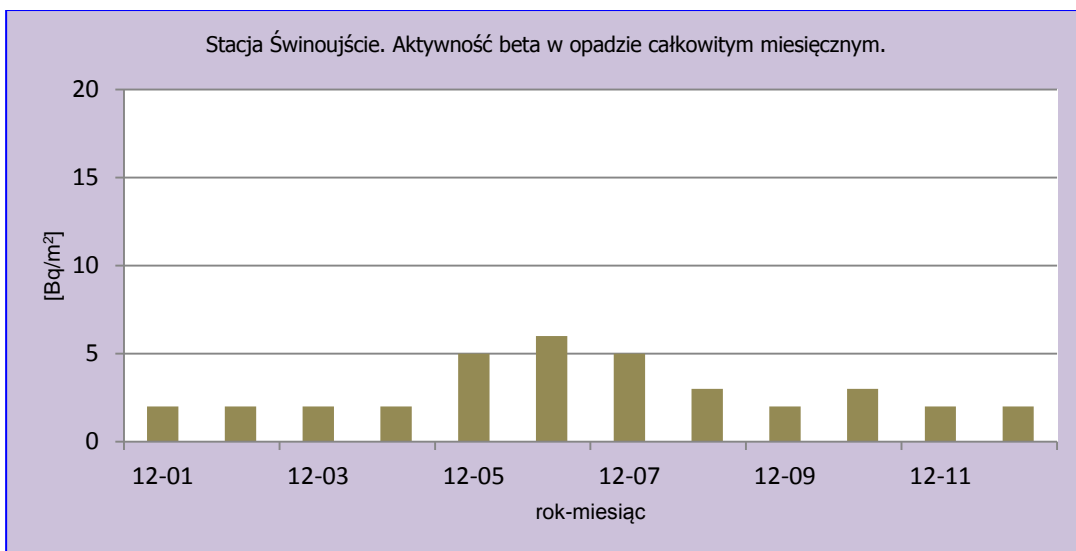
Rys.51. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Gdynia.



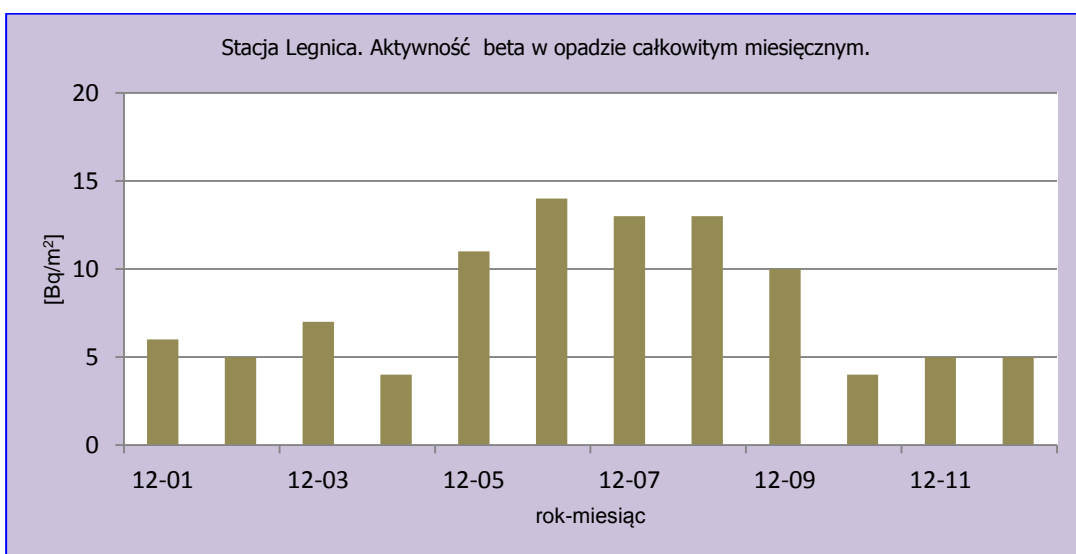
Rys.52. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Mikołajki.



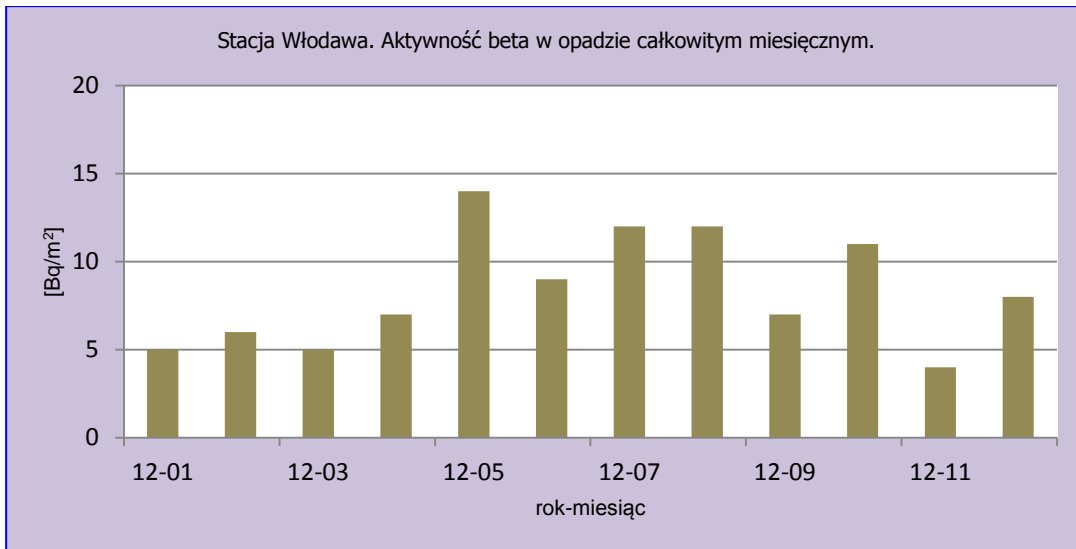
Rys.53. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Poznań.



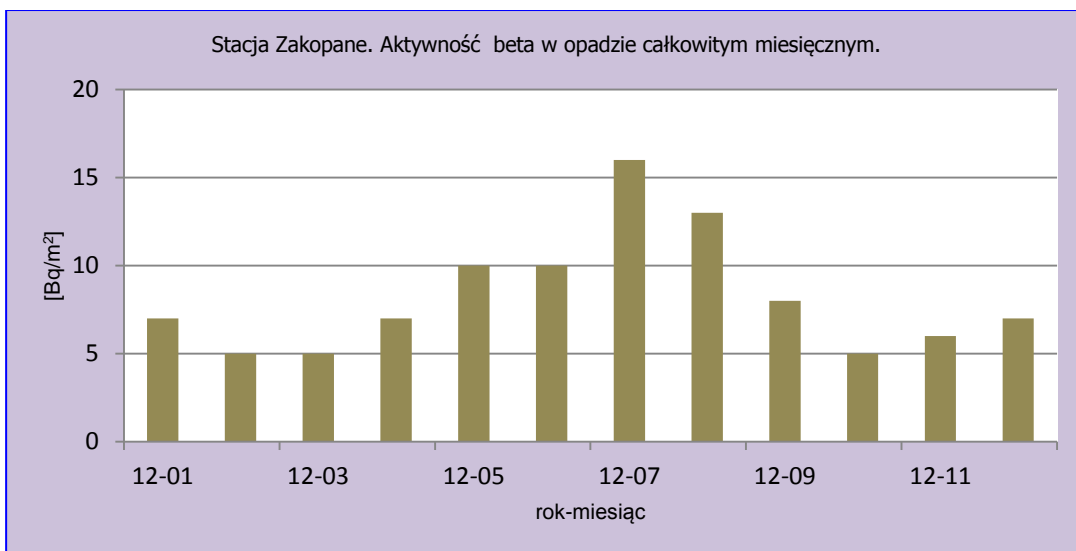
Rys.54. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Świnoujście.



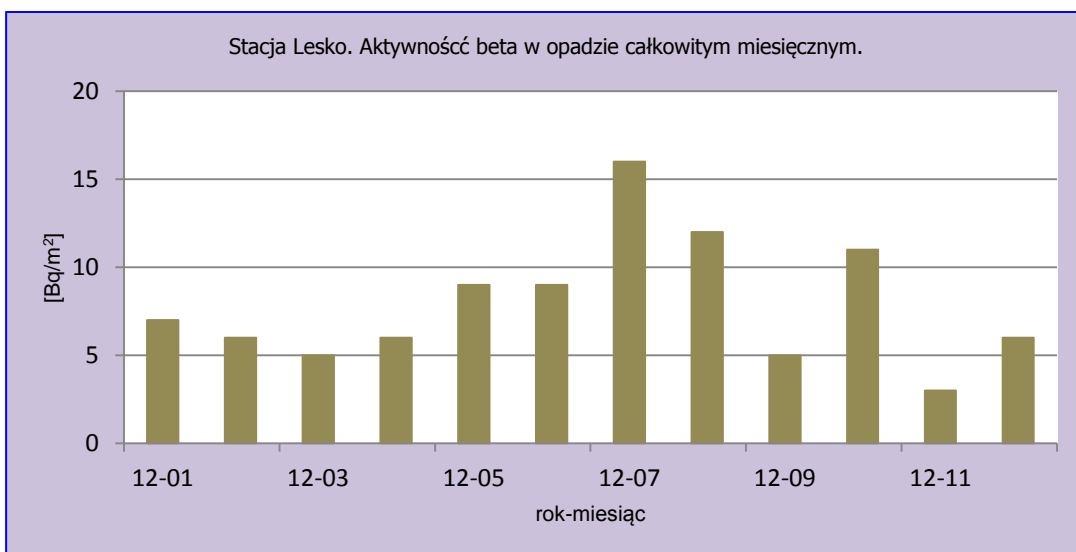
Rys.55. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Legnica.



Rys.56. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Włodawa.



Rys.57. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Zakopane.



Rys.58. Stężenie promieniotwórcze izotopów beta w całkowitym opadzie miesięcznym na stacji Lesko.

3.1. Moc dawki promieniowania gamma w powietrzu

3.1.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012

Miarą poziomu promieniowania gamma związanego z obecnością izotopów emitujących ten rodzaj promieniowania jest moc dawki. Wartości mocy dawki promieniowania gamma w atmosferze mierzone w reżimie dobowym na 9 stacjach IMGW w 2012 roku zmieniały się w stosunkowo szerokim zakresie (Rys. 2-10). Najniższą wartość równą 55 nGy h⁻¹ odnotowano na stacji Włodawa, najwyższą zaś wynoszącą 140 nGy h⁻¹ na stacji Zakopane (Tabela 1). Wartości te odzwierciedlają poziomy rejestrowane na tych stacjach w ciągu całego roku. Najwyższa średnia wartość mocy dawki (115,4 nGy h⁻¹) wyznaczona została na podstawie wartości dobowych zarejestrowanych na stacji Zakopane, co jest zgodne z oczekiwaniem ze względu na fakt podwyższonego promieniowania w rejonie górskim. Minimalna wartość dobowo zmierzona w Zakopanem wynosiła 88 nGy h⁻¹. Najniższa średnia roczna wartość mocy dawki (61,5 nGy h⁻¹) obliczona na podstawie wartości dobowych charakteryzowała okolice Włodawy, w przypadku której najwyższa wartość dobowo wynosiła 92 nGy h⁻¹. Po Zakopanem najwyższe średnie roczne wartości mocy dawki promieniowania gamma wystąpiły również na południu Polski, w Lesku (107,9 nGy h⁻¹) i Legnicy (107,2 nGy h⁻¹). Wartość przekraczającą 100 nGy h⁻¹ odnotowano również na stacji w Mikołajkach. W przypadku pozostałych stacji: Warszawy, Gdyni, Gorzowa Wlkp. i Świnoujście średnie wartości mocy dawki charakteryzujące poziom radioaktywności atmosfery, związany z promieniowaniem gamma, były na poziomie 80 nGy h⁻¹.

Tabela 1. Średnie miesięczne wartości mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu w 2012 roku, nGy h⁻¹.

| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia (m-c) |
|-------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| Styczeń | 80,5 | 86,8 | 101,9 | 85,4 | 85,1 | 104,2 | 62,5 | 103,3 | 111,8 | 91,3 |
| Luty | 77,9 | 85,0 | 95,9 | 84,8 | 82,3 | 102,6 | 59,2 | 94,4 | 101,2 | 87,0 |
| Marzec | 78,7 | 84,4 | 104,1 | 87,6 | 82,7 | 103,3 | 60,0 | 100,2 | 111,8 | 90,3 |
| Kwiecień | 80,5 | 85,6 | 106,9 | 87,7 | 85,0 | 108,1 | 63,0 | 121,7 | 116,2 | 95,0 |
| Maj | 79,4 | 84,3 | 109,0 | 86,2 | 83,5 | 108,4 | 64,0 | 122,2 | 114,7 | 94,6 |
| Czerwiec | 79,8 | 82,6 | 106,0 | 86,6 | 83,8 | 107,2 | 62,5 | 121,2 | 114,0 | 93,7 |
| Lipiec | 79,3 | 79,2 | 104,9 | 78,5 | 81,9 | 106,7 | 60,5 | 119,3 | 114,4 | 91,6 |
| Sierpień | 79,7 | 78,6 | 105,4 | 80,6 | 80,4 | 110,3 | 60,8 | 119,5 | 112,6 | 92,0 |
| Wrzesień | 84,0 | 81,3 | 107,1 | 84,8 | 80,3 | 108,6 | 61,2 | 123,1 | 102,9 | 92,6 |
| Październik | 79,1 | 81,9 | 107,0 | 88,5 | 81,5 | 112,0 | 61,9 | 122,3 | 101,0 | 92,8 |
| Listopad | 79,3 | 83,1 | 102,1 | 88,9 | 82,1 | 109,2 | 60,5 | 121,6 | 99,2 | 91,8 |
| Grudzień | 75,8 | 83,1 | 95,5 | 88,7 | 81,2 | 105,9 | 62,1 | 115,5 | 94,5 | 89,1 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 84,0 | 86,8 | 109,0 | 88,9 | 85,1 | 112,0 | 64,0 | 123,1 | 116,2 | - |
| Minimalna średnia miesięczna | 75,8 | 78,6 | 95,5 | 78,5 | 80,3 | 102,6 | 59,2 | 94,4 | 94,5 | - |
| Maksymalna wartość dobowo | 98,0 | 93,0 | 124,0 | 100,0 | 96,0 | 124,0 | 92,0 | 140,0 | 138,0 | - |
| Minimalna wartość dobowo | 71,0 | 74,0 | 89,0 | 75,0 | 75,0 | 99,0 | 55,0 | 88,0 | 72,0 | - |
| Średnia roczna dobowo | 79,5 | 83,0 | 103,8 | 85,7 | 82,5 | 107,2 | 61,5 | 115,4 | 107,9 | 91,8 |

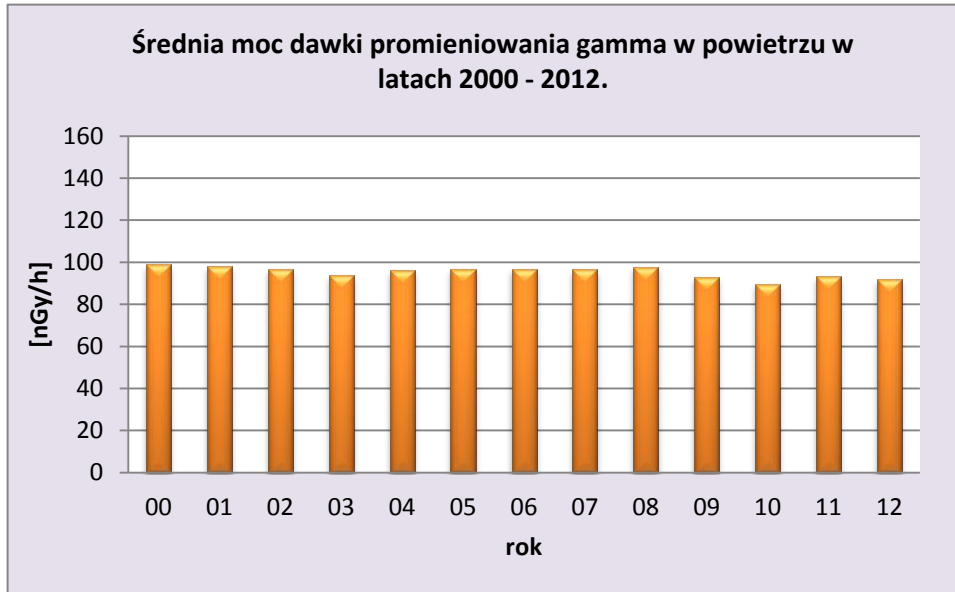
Zasadniczo rozpiętość wyników dobowych uzyskiwanych na wszystkich stacjach była znaczna. Maksymalna różnica pomiędzy skrajnymi wynikami wynosiła 66 nGy h^{-1} na stacji Lesko, najmniejsza zaś, wynosząca 19 nGy h^{-1} , charakteryzowała wyniki uzyskane na stacji Gdynia. Różnice pomiędzy maksymalnymi i minimalnymi wartościami średnimi wyznaczonymi dla każdej stacji, dla poszczególnych miesięcy były już zdecydowanie mniejsze niwelując różnice w wartościach dobowych. Średnie wartości mocy dawki charakteryzujące obszar całej Polski wyznaczone dla poszczególnych miesięcy na podstawie danych ze wszystkich stacji zmieniały się w stosunkowo wąskim zakresie od 87 nGy h^{-1} w lutym do 95 nGy h^{-1} w kwietniu. Otrzymane wyniki wskazują na brak zmienności sezonowej, co oznacza, że głównym elementem determinującym moc dawki promieniowania gamma jest lokalizacja geograficzna.

3.1.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych

Wartość średniej mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu wyznaczona na podstawie danych dobowych zmierzonych na 9 stacjach w 2012 roku wynosiła $91,8 \text{ nGy h}^{-1}$ i była niższa od obserwowanej w roku poprzednim o $1,5 \text{ nGy h}^{-1}$ (Tabela 2, Rys. 59). W latach 2000 - 2012 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 zakresie od $89,6 \text{ nGy h}^{-1}$ (wartości charakterystycznej dla roku 2010) do $99,1 \text{ nGy h}^{-1}$ w roku 2000.

Tabela 2. Wartość średniej rocznej mocy dawki promieniowania gamma w latach 2000 – 2012, nGy 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 |
| Średnia | 95,4 |
| Minimalna | 89,6 |
| Maksymalna | 99,1 |



Rys. 59. Średnia roczna moc dawki promieniowania gamma w latach 2000-2012.

3.2. Radioaktywności alfa naturalna i sztuczna oraz beta sztuczna próbek aerozoli powietrza

3.2.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012

W 2012 roku, podobnie jak w latach poprzednich, na 7 stacjach prowadzono pomiary poziomu radioaktywności związanego z obecnością izotopów, pochodzenia naturalnego i sztucznego, emitujących promieniowanie alfa oraz z obecnością izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta, w próbkach aerozoli (Tabela 3, Rys. 11-17).

Dobowe wartości stężeń promieniotwórczych izotopów emitujących promieniowanie alfa pochodzenia naturalnego zmieniały się w bardzo szerokim zakresie. Najniższe aktywności na poziomie $0,1 \text{ Bq m}^{-3}$ zaobserwowano na stacjach Włodawa i Zakopane (Tabela 3), Natomiast maksymalna wartość dobowa wystąpiła na stacji Lesko ($31,6 \text{ Bq m}^{-3}$). Zbliżone dobowe wartości maksymalne odnotowano na stacjach Zakopane ($29,9 \text{ Bq m}^{-3}$) i Gorzów Wlkp. ($29,1 \text{ Bq m}^{-3}$). Najniższe stężenia izotopów alfa promieniotwórczych charakteryzowały aerozole zbierane na stacji w Świnoujściu, gdzie średnie wartości miesięczne zmieniały się w zakresie od $1,8$ do $4,5 \text{ Bq m}^{-3}$. Najwyższą średnią miesięczną wartość ($18,6 \text{ Bq m}^{-3}$) odnotowano w listopadzie na stacji Gorzów Wlkp. i w następnej kolejności w lutym na stacji Lesko ($12,9 \text{ Bq m}^{-3}$). Najniższe średnie miesięczne stężenia izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa były na poziomie $1,5-1,7$ i charakteryzowały próbki aerozoli zebrane marcu w Gorzowie Wlkp. i Włodawie, oraz zebrane w kwietniu na stacji Świnoujście. Średnie wartości stężeń wyznaczone dla poszczególnych miesięcy z danych uzyskanych na 7 stacjach zmieniały się od wartości $3,2$ wyznaczonej dla marca do wartości obliczonej w listopadzie – $9,7 \text{ Bq m}^{-3}$.

Tabela. 3. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach w 2012, Bq m⁻³.

| Miesiąc | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia (m-c) |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Styczeń | 5,27 | 3,59 | 2,40 | 3,90 | 3,97 | 8,63 | 7,28 | 5,00 |
| Luty | 6,91 | 2,12 | 1,97 | 6,85 | 5,35 | 12,59 | 12,90 | 6,96 |
| Marzec | 2,96 | 1,53 | 1,93 | 4,63 | 1,75 | 5,50 | 4,19 | 3,21 |
| Kwiecień | brak danych | 4,53 | 1,75 | 5,79 | 2,56 | 5,89 | 5,45 | 4,33 |
| Maj | 3,59 | 7,90 | 1,84 | 6,20 | 2,51 | 6,30 | 6,07 | 4,92 |
| Czerwiec | 3,61 | 7,88 | 1,86 | 5,51 | 2,73 | 6,45 | 7,03 | 5,01 |
| Lipiec | 4,66 | 9,96 | 1,99 | 5,89 | 3,46 | 7,71 | 8,05 | 5,96 |
| Sierpień | 4,69 | 7,95 | 2,44 | 8,02 | 3,91 | 8,03 | 9,99 | 6,43 |
| Wrzesień | 4,98 | 11,51 | 2,85 | 3,44 | 4,94 | 8,38 | 10,71 | 6,69 |
| Październik | 6,31 | 8,72 | 3,86 | 3,77 | 5,46 | 8,28 | 10,09 | 6,64 |
| Listopad | 9,35 | 18,62 | 4,45 | 8,46 | 7,57 | 9,26 | 10,01 | 9,68 |
| Grudzień | 7,70 | 6,04 | 3,50 | 6,19 | 6,46 | 10,96 | 10,57 | 7,34 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 9,35 | 18,62 | 4,45 | 8,46 | 7,57 | 12,59 | 12,90 | - |
| Minimalna średnia miesięczna | 2,96 | 1,53 | 1,75 | 3,44 | 1,75 | 5,50 | 4,19 | - |
| Maksymalna wartość dobową | 20,92 | 29,05 | 12,69 | 26,72 | 16,74 | 29,92 | 31,56 | - |
| Minimalna wartość dobową | - | - | 0,30 | 0,60 | 0,10 | 0,10 | 0,92 | - |
| Średnia roczna dobową | 5,61 | 7,25 | 2,57 | 5,71 | 4,25 | 8,14 | 8,53 | 6,0 |

Na wszystkich stacjach, gdzie prowadzone są pomiary stężeń promieniotwórczych izotopów pochodzenia antropogenicznego emitujących promieniowanie alfa odnotowano dobowe wartości minimalne pozostające poniżej limitów detekcji (Tabela 4, Rys. 18-24). Maksymalną wartość dobową wynoszącą 0,646 Bq m⁻³ zmierzono na stacji Gorzów Wlkp. W przypadku 4 stacji: Mikołajki, Gorzów Wlkp., Legnica i Zakopane również minimalne wartości średnich stężeń promieniotwórczych wyznaczonych dla okresów miesięcznych pozostawały na poziomie zera. Maksymalna średnia miesięczna wartość (0,22 Bq m⁻³) wystąpiła na stacji Gorzów Wlkp., w przypadku której średnie wartości miesięczne w okresie od maja do września były kilkukrotnie wyższe od średnich miesięcznych stężeń obliczonych dla tych samych miesięcy na pozostałych stacjach. Średnia obliczona dla wszystkich miesięcy na podstawie danych ze wszystkich stacji zmieniała się w zakresie od 0,008 Bq m⁻³ – wartości charakterystycznej dla marca do 0,056 Bq m⁻³ – wartości wyznaczonej z danych wrześniowych.

Należy podkreślić, że poziom promieniowania alfa pochodzenia sztucznego stanowił tylko ok. 5% poziomu radioaktywności związanego z promieniowaniem alfa ze źródeł naturalnych.

Tabela 4. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w aerozolach w 2012 roku, Bq m⁻³.

| Miesiąc | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia (m-c) |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Styczeń | 0,000 | 0,000 | 0,015 | 0,001 | 0,007 | 0,001 | 0,120 | 0,020 |
| Luty | 0,000 | 0,000 | 0,015 | 0,000 | 0,012 | 0,000 | 0,161 | 0,027 |
| Marzec | 0,002 | 0,000 | 0,009 | 0,005 | 0,003 | 0,016 | 0,024 | 0,008 |
| Kwiecień | brak danych | 0,063 | 0,014 | 0,018 | 0,004 | 0,012 | 0,031 | 0,023 |
| Maj | 0,012 | 0,144 | 0,021 | 0,024 | 0,007 | 0,020 | 0,037 | 0,038 |
| Czerwiec | 0,005 | 0,129 | 0,014 | 0,011 | 0,002 | 0,015 | 0,033 | 0,030 |
| Lipiec | 0,017 | 0,137 | 0,015 | 0,022 | 0,007 | 0,013 | 0,049 | 0,037 |
| Sierpień | 0,020 | 0,150 | 0,022 | 0,037 | 0,007 | 0,027 | 0,072 | 0,048 |
| Wrzesień | 0,035 | 0,217 | 0,030 | 0,031 | 0,004 | 0,016 | 0,062 | 0,056 |
| Październik | 0,008 | 0,055 | 0,031 | 0,014 | 0,002 | 0,012 | 0,063 | 0,026 |
| Listopad | 0,000 | 0,013 | 0,011 | 0,009 | 0,003 | 0,006 | 0,049 | 0,013 |
| Grudzień | 0,006 | 0,026 | 0,005 | 0,006 | 0,015 | 0,006 | 0,050 | 0,016 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 0,035 | 0,217 | 0,031 | 0,037 | 0,015 | 0,027 | 0,161 | - |
| Minimalna średnia miesięczna | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,024 | - |
| Maksymalna wartość dobową | 0,097 | 0,646 | 0,092 | 0,148 | 0,1 | 0,108 | 0,456 | - |
| Minimalna wartość dobową | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | - |
| Średnia roczna dobową | 0,010 | 0,078 | 0,017 | 0,015 | 0,006 | 0,012 | 0,063 | 0,029 |

Podobnie jak w przypadku izotopów antropogenicznych emitujących promieniowanie alfa, dobowe stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta dosyć często pozostawały poniżej limitu detekcji stosowanej metody pomiarowej. Największą częstotliwość występowania takich wyników odnotowano na stacji Mikołajki, dla której maksymalne średnie miesięczne stężenie związane z obecnością izotopów emitujących promieniowanie beta wynosiło zaledwie 0,030 Bq m⁻³ (Tabela 5, Rys. 25-31). Maksymalne wartości dobowych stężeń promieniotwórczych zmieniały się w dość szerokim zakresie, od 0,33 Bq m⁻³ na stacji Lesko do 1,24 Bq m⁻³ na stacjach Świnoujście i Włodawa (Tabela 5). Na stacjach Mikołajki i Legnica maksymalne wartości dobowe były zbliżone (0,82 Bq m⁻³). Średnie stężenia wyznaczone dla poszczególnych miesięcy odzwierciedlały różnice w wartościach dobowych obserwowanych na stacjach. Najwyższe wartości średnich miesięcznych stężeń izotopów beta promieniotwórczych zidentyfikowano na stacjach Świnoujście (0,993 Bq m⁻³) i Włodawa (0,920 Bq m⁻³). Dosyć znaczne zróżnicowanie charakteryzowało średnie stężenia wyznaczone dla poszczególnych miesięcy z wyników uzyskanych na 7 stacjach. Najniższe wartości na poziomie 0,07 Bq m⁻³ odnotowano w styczniu i lutym, w kolejnych miesiącach obserwowano wzrost do wartości maksymalnej 0,378 Bq m⁻³, która charakteryzowała poziom radioaktywności związany z obecnością sztucznych emiterów promieniowania beta we wrześniu. Po tym okresie nastąpił spadek średniego stężenia do wartości 0,096 Bq m⁻³ w grudniu, co mogłoby sugerować zależność aktywności beta w aerozolach od sezonu wskazując na większy ich dopływ w miesiącach letnich.

Tabela 5. Średnie miesięczne stężenia promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach w 2012 roku, Bq m⁻³.

| Miesiąc | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia (m-c) |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Styczeń | 0,000 | 0,000 | 0,288 | 0,032 | 0,075 | 0,048 | 0,077 | 0,074 |
| Luty | 0,000 | 0,000 | 0,273 | 0,018 | 0,206 | 0,000 | 0,045 | 0,077 |
| Marzec | 0,000 | 0,000 | 0,437 | 0,080 | 0,048 | 0,027 | 0,008 | 0,086 |
| Kwiecień | 0,000 | 0,068 | 0,299 | 0,162 | 0,227 | 0,064 | 0,034 | 0,122 |
| Maj | 0,003 | 0,192 | 0,336 | 0,161 | 0,367 | 0,116 | 0,038 | 0,173 |
| Czerwiec | 0,000 | 0,231 | 0,710 | 0,085 | 0,555 | 0,076 | 0,022 | 0,240 |
| Lipiec | 0,000 | 0,286 | 0,658 | 0,133 | 0,304 | 0,071 | 0,033 | 0,212 |
| Sierpień | 0,000 | 0,277 | 0,696 | 0,192 | 0,628 | 0,149 | 0,044 | 0,284 |
| Wrzesień | 0,008 | 0,361 | 0,993 | 0,249 | 0,920 | 0,086 | 0,026 | 0,378 |
| Październik | 0,014 | 0,013 | 0,884 | 0,182 | 0,622 | 0,062 | 0,017 | 0,256 |
| Listopad | 0,001 | 0,084 | 0,495 | 0,121 | 0,019 | 0,031 | 0,006 | 0,108 |
| Grudzień | 0,030 | 0,549 | 0,016 | 0,036 | 0,007 | 0,032 | 0,004 | 0,096 |
| Maksymalna średnia miesięczna | 0,030 | 0,549 | 0,993 | 0,249 | 0,920 | 0,149 | 0,077 | - |
| Minimalna średnia miesięczna | 0,000 | 0,000 | 0,016 | 0,018 | 0,007 | 0,000 | 0,004 | - |
| Maksymalna wartość dobową | 0,827 | 1,207 | 1,243 | 0,820 | 1,242 | 0,558 | 0,330 | - |
| Minimalna wartość dobową | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | - |
| Średnia roczna dobową | 0,005 | 0,185 | 0,403 | 0,121 | 0,312 | 0,064 | 0,030 | 0,160 |

3.2.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych , określenie zmian

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych emitujących promieniowanie alfa w aerozolach zawieszonych w powietrzu w 2012 roku wynosiło 6,0 Bq m⁻³ i była niższe zarówno od wartości średniej charakterystycznej dla roku 2011 (7,4 Bq m⁻³), jak i wartości średniej (7,1 Bq m⁻³) wyznaczonej dla okresu lat 2000-2012 (Tabela 6). W porównywanym okresie nie obserwuje się jednoznacznych trendów zmian. Najniższe średnie stężenie (4,9 Bq m⁻³) odnotowano w 2001, natomiast najwyższe (8,6 Bq m⁻³) w 2008 roku.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w 2012 roku wynosiło 0,029 Bq m⁻³ i było niższe o 0,01 od obserwowanego w roku poprzednim i tylko nieznacznie wyższe od średniej w lat 2000-2012 (Tabela 7). Najniższą wartość w tym okresie odnotowano w roku 2001 (0,004 Bq m⁻³), najwyższą zaś w roku 2009 (0,040 Bq m⁻³).

Tabela 6. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego emitujących promieniowanie alfa w latach 2000 – 2012, 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 |
| Średnia | 7,1 |
| Maksymalna | 8,6 |
| Minimalna | 4,9 |

Tabela 7. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie alfa w latach 2000 – 2012, 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 |
| Średnia | 0,024 |
| Maksymalna | 0,040 |
| Minimalna | 0,004 |

Średnie roczne stężenie izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta w 2012 roku było najwyższe spośród wartości obserwowanych w okresie od 2000 do 2012 roku (Tabela 8). Było również prawie trzykrotnie wyższe od średniej z omawianego okresu i prawie dwukrotnie wyższe od wartości charakterystycznej dla roku poprzedniego. Aktywność promieniotwórcza związana z obecnością izotopów emitujących promieniowanie beta w aerozolach była również ok pięciokrotnie wyższa od aktywności wynikającej z udziału izotopów pochodzenia antropogenicznego emitujących promieniowanie alfa.

Mimo, że wspomniana aktywność beta wzrosła kilkukrotnie to nadal są wartości są bardzo niskie na poziomie naturalnego tła promieniowania.

Tabela 8. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów pochodzenia sztucznego emitujących promieniowanie beta w latach 2000 – 2012, 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 |
| Średnia | 0,057 |
| Maksymalna | 0,160 |
| Minimalna | 0,017 |

3.3. Globalna aktywności beta dobowego i miesięcznego opadu całkowitego

3.3.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012

Przez opad całkowity należy rozumieć cząstki pyłów i innych substancji zarówno mokrych, jak i suchych dopływających do powierzchni ziemi z atmosfery.

Globalna aktywność beta opadu całkowitego wynika z obecności izotopów emitujących promieniowanie beta, których stężenia promieniotwórcze określane są jako wartość całkowita. Minimalne dobowe stężenia izotopów beta promieniotwórczych w próbkach całkowitego opadu dobowego przyjmowały wartości na poziomie zera na wszystkich stacjach. Maksymalne wartości dobowe zmieniały się w zakresie od 3 Bq m⁻² (na stacjach Warszawa, Gdynia, Gorzów Wlkp., Świnoujście, Zakopane i Lesko) do 5 Bq m⁻², która to wartość wystąpiła na stacji Włodawa (Tabela 9, Rys 32-40). W Legnicy maksymalne dobowe stężenie izotopów emitujących promieniowanie beta wyniosło w 2012 roku 4 Bq m⁻². Średnie miesięczne aktywności beta wyznaczone na podstawie pomiarów dobowych zmieniały się w dość wąskim zakresie. Najniższe wartości odnotowano na stacji Świnoujście, gdzie średnie miesięczne

stężenia promieniotwórcze izotopów beta zmieniały się w zakresie od 0,1 do 0,6 Bq m⁻², w przeciwieństwie do stacji Legnicy, gdzie wartości te oscylowały od 0,9 do 1,5 Bq m⁻².

Z porównania średnich wartości rocznych wyznaczonych na podstawie danych dobowych wynika, że najniższy dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta (0,4 Bq m⁻²) charakteryzował okolice Świnoujścia, co może mieć związek z częstszymi i bardziej intensywnymi wiatrami występującymi w strefie nadmorskiej, co potwierdzałyby również wyniki pomiarów prowadzonych na stacji Gdynia (średnia roczna wynosi 0,7 Bq m⁻²). Najwyższe średnie roczne aktywności beta w 2012 roku charakteryzowały stacje w Mikołajkach, Legnicy i Zakopanem.

Średnie stężenia promieniotwórcze izotopów beta w poszczególnych miesiącach charakterystyczne dla obszaru całej Polski (wyznaczone z wyników dobowych uzyskanych na wszystkich stacjach) zmieniały się w bardzo wąskim zakresie od 0,8 do 1,0 Bq m⁻², a średnia roczna dla wszystkich stacji w 2012 roku wyniosła 0,9 Bq m⁻².

Tabela 9. Średnie miesięczne stężenia izotopów beta w dobowym opadzie całkowitym w 2012 roku, Bq m⁻².

| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia (m-c) |
|--------------------------|--------------|------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| Styczeń | 0,8 | 0,7 | 1,1 | 0,9 | 0,4 | 1,1 | 1,0 | 1,2 | 1,0 | 0,9 |
| Luty | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,4 | 1,2 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,9 |
| Marzec | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 0,3 | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Kwiecień | 0,6 | 0,6 | 1,1 | 0,9 | 0,4 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,8 |
| Maj | 0,7 | 0,5 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 1,1 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 0,9 |
| Czerwiec | 0,8 | 0,8 | 1,4 | 0,9 | 0,2 | 1,5 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |
| Lipiec | 0,9 | 0,9 | 1,4 | 1,2 | 0,1 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 0,9 | 1,0 |
| Sierpień | 0,7 | 0,5 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 0,7 | 0,9 |
| Wrzesień | 0,6 | 0,7 | 1,1 | 0,8 | 0,2 | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 0,8 | 0,8 |
| Październik | 0,7 | 0,7 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 0,9 |
| Listopad | 0,7 | 0,8 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,8 |
| Grudzień | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,5 | 1,2 | 0,9 | 0,8 |
| Maksymalna miesięczna | 1,1 | 0,9 | 1,4 | 1,2 | 0,6 | 1,5 | 1,3 | 1,4 | 1,1 | - |
| Minimalna miesięczna | 0,6 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 0,1 | 0,9 | 0,5 | 0,8 | 0,7 | - |
| Maksymalna dobowa | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 3,0 | 3,0 | - |
| Minimalna dobowa | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - |
| Średnia roczna | 0,8 | 0,7 | 1,1 | 0,9 | 0,4 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 0,9 |
| Suma roczna dobowa | 323,3 | | | | | | | | | |

Mianem globalnej aktywności beta wody opadowej określa się aktywność izotopów emitujących promieniowanie beta w całkowitym opadzie dobowym odniesioną do objętości wody opadowej. Obliczana jest tylko wtedy, gdy wysokość opadu przekracza 1 mm. Maksymalna wartość dobowej globalnej aktywności beta wody opadowej wynosząca 2343 mBq l⁻¹ wystąpiła na stacji Zakopane (Tabela 10, Rys. 41-49). Na stacjach Włodawa i Mikołajki maksymalne wartości dobowe były na poziomie 2000 mBq l⁻¹, natomiast w przypadku pozostałych stacji zmieniały się w zakresie od 1000 mBq l⁻¹ do 1300 mBq l⁻¹. Maksymalne wartości średnie wyznaczone dla poszczególnych miesięcy zmieniały się od 269,2 mBq l⁻¹ na stacji Świnoujście do 749,6 mBq l⁻¹ na stacji Włodawa. Biorąc pod uwagę średnie roczne aktywności beta wody opadowej, to najniższe wartości odnotowano na stacji Świnoujście (149,9 mBq l⁻¹) i

w dalszej kolejności na stacji Gdynia (250,5 mBq I⁻¹), najwyższe zaś na stacjach Mikołajki (478,2 mBq I⁻¹) i Włodawa (462,7 mBq I⁻¹), co pozostaje w ścisłym związku ze stężeniami promieniotwórczymi izotopów emitujących promieniowanie beta w całkowitym opadzie dobowym.

Brak jest bardzo znaczących różnic pomiędzy średnimi aktywnościami beta wyznaczonymi dla poszczególnych miesięcy na podstawie danych ze wszystkich stacji. Najniższą wartość średnią wyznaczono dla kwietnia (243,1 mBq I⁻¹), najwyższą zaś dla stycznia (391,0 mBq I⁻¹).

Tabela 10. Średnie miesięczne wartości aktywności beta wody opadowej w 2012 roku, mBq I⁻¹.

| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Gorzów Wlkp. | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko | Średnia (m-c) |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Styczeń | 356,0 | 327,3 | 515,1 | 205,0 | 120,7 | 368,0 | 657,0 | 610,9 | 359,4 | 391,0 |
| Luty | 270,7 | 417,0 | 619,2 | 426,1 | 112,8 | 589,5 | 356,7 | 182,0 | 328,7 | 367,0 |
| Marzec | 598,8 | 428,7 | 367,0 | 426,5 | 269,2 | 260,0 | 348,2 | 377,9 | 228,6 | 367,2 |
| Kwiecień | 289,8 | 213,5 | 239,1 | 206,6 | 115,1 | 196,8 | 420,8 | 264,9 | 241,4 | 243,1 |
| Maj | 297,3 | 191,0 | 600,3 | 231,5 | 129,5 | 320,9 | 749,6 | 554,8 | 234,4 | 367,7 |
| Czerwiec | 287,6 | 181,2 | 354,7 | 297,2 | 79,9 | 466,6 | 398,1 | 263,4 | 247,1 | 286,2 |
| Lipiec | 401,3 | 149,7 | 410,9 | 285,2 | 162,1 | 337,9 | 590,0 | 353,7 | 180,1 | 319,0 |
| Sierpień | 263,3 | 122,3 | 292,7 | 578,9 | 99,8 | 377,1 | 376,8 | 505,8 | 233,4 | 316,7 |
| Wrzesień | 355,4 | 223,0 | 672,0 | 286,0 | 38,0 | 374,8 | 384,8 | 429,1 | 548,4 | 367,9 |
| Październik | 342,0 | 255,4 | 440,6 | 483,9 | 118,7 | 430,3 | 423,2 | 276,5 | 242,3 | 334,8 |
| Listopad | 276,8 | 323,8 | 657,3 | 197,1 | 171,0 | 463,0 | 440,8 | 431,1 | 385,8 | 371,9 |
| Grudzień | 317,7 | 302,6 | 536,2 | 313,6 | 264,4 | 430,8 | 348,8 | 398,2 | 357,5 | 363,3 |
| Maksymalna miesięczna | 598,8 | 428,7 | 672,0 | 578,9 | 269,2 | 589,5 | 749,6 | 610,9 | 548,4 | - |
| Minimalna miesięczna | 263,3 | 122,3 | 239,1 | 197,1 | 38,0 | 196,8 | 348,2 | 182,0 | 180,1 | - |
| Maksymalna dobowa | 1000,0 | 1267,0 | 2000,0 | 1158,0 | 1330,0 | 1692,0 | 2053,0 | 2343,0 | 1296,0 | - |
| Minimalna dobowa | 29,0 | 14,0 | 71,0 | 0,0 | 0,0 | 78,0 | 0,0 | 26,0 | 34,0 | - |
| Średnia roczna | 325,5 | 250,5 | 478,2 | 320,7 | 149,9 | 397,5 | 462,7 | 401,0 | 287,1 | 341,5 |

Średnia aktywność beta wody opadowej charakterystyczna dla 2012 roku wynosiła 342 mBq I⁻¹ i była bardzo zbliżona do wartości obserwowanych w latach 2000-2011, które zmieniały się w wąskim zakresie od 328 do 376 mBq I⁻¹. Wartość średnia dla okresu 2000-2012 wyniosła 351 mBq I⁻¹.

Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego związana jest, podobnie jak ma to miejsce w przypadku globalnej aktywności całkowitego opadu dobowego, z obecnością izotopów emitujących promieniowanie beta w próbkach całkowitego opadu zbieranych w reżimie miesięcznym. Zasadniczo najniższe aktywności beta miesięcznych próbek opadu całkowitego odnotowano na stacji Świnoujście, o czym świadczą zarówno średnia uzyskana ze wszystkich wyników wynosząca 3 Bq m⁻², jak również zakres w jakim zmieniały się mierzone wartości czyli od 2 do 6 Bq m⁻², (Tabela 11, Rys. 50-58). Poza Gdynią, gdzie wartość średnia aktywności beta wynosiła 6,0 Bq m⁻² na pozostałych stacjach średnie stężenia promieniotwórcze zmieniały się w stosunkowo wąskim zakresie od 7,6 Bq m⁻² na stacji Mikołajki do 8,6 Bq m⁻² na stacji Poznań. Najwyższa aktywność beta opadu miesięcznego w 2012 roku (19 Bq m⁻²) została zmierzona w lipcu na stacji Poznań, najniższe wartości równe 2 Bq m⁻² wystąpiły w grudniu na

stacji Gdynia oraz w miesiącach od stycznia do kwietnia, w listopadzie i w grudniu na stacji Świnoujście. Cechą charakterystyczną obserwowaną niemal na wszystkich stacjach (z wyjątkiem stacji Świnoujście) jest wzrost globalnej aktywności beta powyżej 10 Bq m⁻² w próbkach całkowitych opadów miesięcznych zbieranych w miesiąca letnich od czerwca do sierpnia, co pozostaje w znacznej korelacji ze wzrostem stężeń promieniotwórczych izotopów pochodzenia antropogenicznego emitujących promieniowanie beta w próbkach aerozoli zwieszonych w powietrzu.

Tabela 11. Zestawienie wyników aktywności beta zbiorczych próbek miesięcznego opadu całkowitego w roku 2012, w Bq m⁻².

| Miesiąc | Warszawa | Gdynia | Mikołajki | Poznań | Świnoujście | Legnica | Włodawa | Zakopane | Lesko |
|-------------------|------------|--------|-----------|--------|-------------|---------|---------|----------|-------|
| 01 | 8 | 6 | 5 | 6 | 2 | 6 | 5 | 7 | 7 |
| 02 | 6 | 6 | 5 | 5 | 2 | 5 | 6 | 5 | 6 |
| 03 | 7 | 11 | 5 | 7 | 2 | 7 | 5 | 5 | 5 |
| 04 | 9 | 4 | 7 | 5 | 2 | 4 | 7 | 7 | 6 |
| 05 | 9 | 3 | 11 | 11 | 5 | 11 | 14 | 10 | 9 |
| 06 | 10 | 3 | 10 | 11 | 6 | 14 | 9 | 10 | 9 |
| 07 | 12 | 12 | 11 | 19 | 5 | 13 | 12 | 16 | 16 |
| 08 | 9 | 9 | 14 | 12 | 3 | 13 | 12 | 13 | 12 |
| 09 | 7 | 7 | 7 | 7 | 2 | 10 | 7 | 8 | 5 |
| 10 | 9 | 5 | 5 | 6 | 3 | 4 | 11 | 5 | 11 |
| 11 | 5 | 4 | 6 | 7 | 2 | 5 | 4 | 6 | 3 |
| 12 | 6 | 2 | 5 | 7 | 2 | 5 | 8 | 7 | 6 |
| Średnia | 8,1 | 6,0 | 7,6 | 8,6 | 3,0 | 8,1 | 8,3 | 8,3 | 7,9 |
| Maksymalna | 12 | 12 | 14 | 19 | 6 | 14 | 14 | 16 | 16 |
| Minimalna | 5 | 2 | 5 | 5 | 2 | 4 | 4 | 5 | 3 |
| Średnia roczna | 7,3 | | | | | | | | |
| Maksymalna roczna | 19 | | | | | | | | |
| Minimalna roczna | 2 | | | | | | | | |

3.3.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian

Sumaryczna aktywność beta, opisująca dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta do powierzchni ziemi, charakterystyczna dla całego obszaru Polski obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wszystkich stacjach w 2012 roku wyniosła 0,32 kBq m⁻²rok⁻¹ (Tabela 12) i była identyczna z wartością średnią wyznaczoną dla okresu 2000-2012.

Średnia aktywność wody opadowej w miesięcznym opadzie całkowitym dla roku 2012 (343 mBq/l) była zbliżona do wartości średniej obliczonej dla okresu 2000-2012, w którym wartości wyznaczone dla poszczególnych lat zmieniały się w zakresie od 328 do 376 Bq m⁻² (Tabela 13).

Tabela 12. Sumaryczna aktywność beta całkowitego opadu dobowego dla sieci 9 stacji w latach 2000 – 2012, 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 |
| Średnia | 0,32 |
| Maksymalna | 0,34 |
| Minimalna | 0,30 |

Tabela 13. Średnie aktywności beta wody opadowej w latach 2000 – 2012, 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 |
| Średnia | 351 |
| Minimalna | 328 |
| Maksymalna | 376 |

Średnia aktywność beta w miesięcznym opadzie całkowitym charakterystyczna dla roku 2012 (7,3 Bq m⁻²) była zbliżona do wartości średniej obliczonej dla okresu 2000-2012, w którym wartości wyznaczone dla poszczególnych lat zmieniały się w zakresie od 6,0 do 8,2 Bq m⁻² (Tabela 14).

Tabela 14. Średnie wartości aktywności beta całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000 - 2012.

| Rok | Średnia aktywność beta |
|-------------|------------------------|
| 2000 | 6,1 |
| 2001 | 7,1 |
| 2002 | 6,7 |
| 2003 | 6,6 |
| 2004 | 6,4 |
| 2005 | 6 |
| 2006 | 6,2 |
| 2007 | 6,5 |
| 2008 | 6,4 |
| 2009 | 7,8 |
| 2010 | 8,2 |
| 2011 | 8 |
| 2012 | 7,3 |
| Średnia | 6,9 |
| Minimalna | 6 |
| Maksymalna | 8,2 |

3.4. Stężenia promieniotwórcze wybranych sztucznych i naturalnych izotopów gamma promieniotwórczych w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego

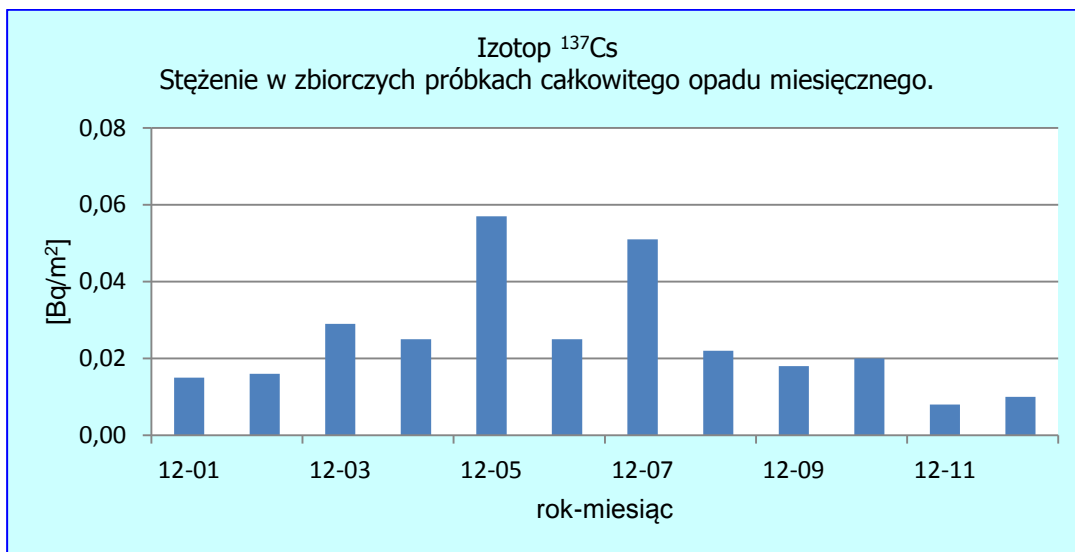
3.4.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012

Izotop Cs-137 i Cs-134

Promieniotwórcze izotopy cezu są izotopami pochodzenia antropogenicznego o stosunkowo długim czasie połowicznego rozpadu (30,05 lat) w przypadku ^{137}Cs i zdecydowanie krótszym (2,07 lat) w przypadku ^{134}Cs . Ich stężenie promieniotwórcze (aktywność odniesiona do powierzchni) oznaczane jest w zbiorczych (pochodzących z 9 stacji) próbkach całkowitego opadu miesięcznego i mogą zostać uznane za reprezentatywne dla całego obszaru Polski. Najniższe stężenia ^{137}Cs odnotowano w listopadzie ($0,008 \text{ Bq m}^{-2}$) i grudniu ($0,010 \text{ Bq m}^{-2}$) – (Tabela 15 i Rys. 60), czyli w miesiącach zimowych, co pozostaje w korelacji z wynikami pomiarów globalnej aktywności beta w próbkach całkowitego opadu miesięcznego (izotopy cezu emitują również promieniowanie beta). W styczniu i lutym stężenia były tylko nieznacznie wyższe i wynosiły odpowiednio $0,015 \text{ Bq m}^{-2}$ i $0,016 \text{ Bq m}^{-2}$. Najwyższe wartości stężeń wystąpiły w miesiącach wiosenno-letnich z maksimum w maju ($0,057 \text{ Bq m}^{-2}$). W lipcu dopływ ^{137}Cs był tylko nieznacznie niższy niż w maju ($0,051 \text{ Bq m}^{-2}$). Jednocześnie lipiec był jedynym miesiącem, w którym stężenie promieniotwórcze ^{134}Cs przekroczyło limit detekcji stosowanej metody pomiarowej i wynosiło $0,013 \text{ Bq m}^{-2}$. Średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego zbieranych w 2012 roku wynosiło $0,025 \text{ Bq m}^{-2}$.

Tabela 15. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{134}Cs w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2012 r., Bq m^{-2} .

| Lp. | Miesiąc | ^{137}Cs | ^{134}Cs |
|-----|-------------|-------------------|-------------------|
| 1 | Styczeń | 0,015 ± 0,004 | |
| 2 | Luty | 0,016 ± 0,004 | |
| 3 | Marzec | 0,029 ± 0,005 | |
| 4 | Kwiecień | 0,025 ± 0,004 | |
| 5 | Maj | 0,057 ± 0,005 | |
| 6 | Czerwiec | 0,025 ± 0,004 | |
| 7 | Lipiec | 0,051 ± 0,005 | 0,013 ± 0,001 |
| 8 | Sierpień | 0,022 ± 0,004 | |
| 9 | Wrzesień | 0,018 ± 0,004 | |
| 10 | Październik | 0,020 ± 0,004 | |
| 11 | Listopad | 0,008 ± 0,003 | |
| 12 | Grudzień | 0,010 ± 0,004 | |
| | Suma roczna | 0,296 | |
| | średnia | 0,025 | |
| | maksymalna | 0,057 | |
| | minimalna | 0,008 | |

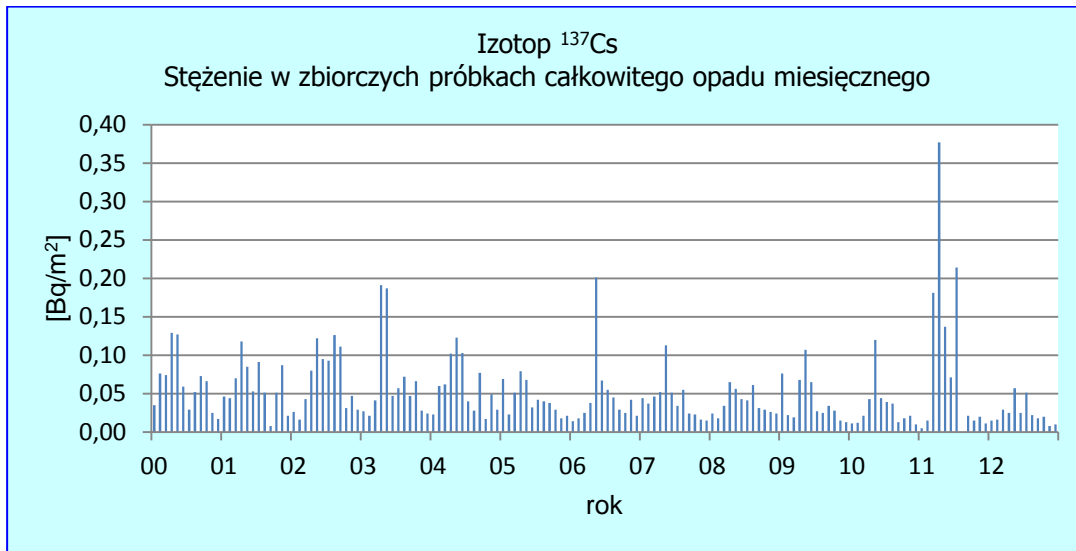


Rys.60. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego.

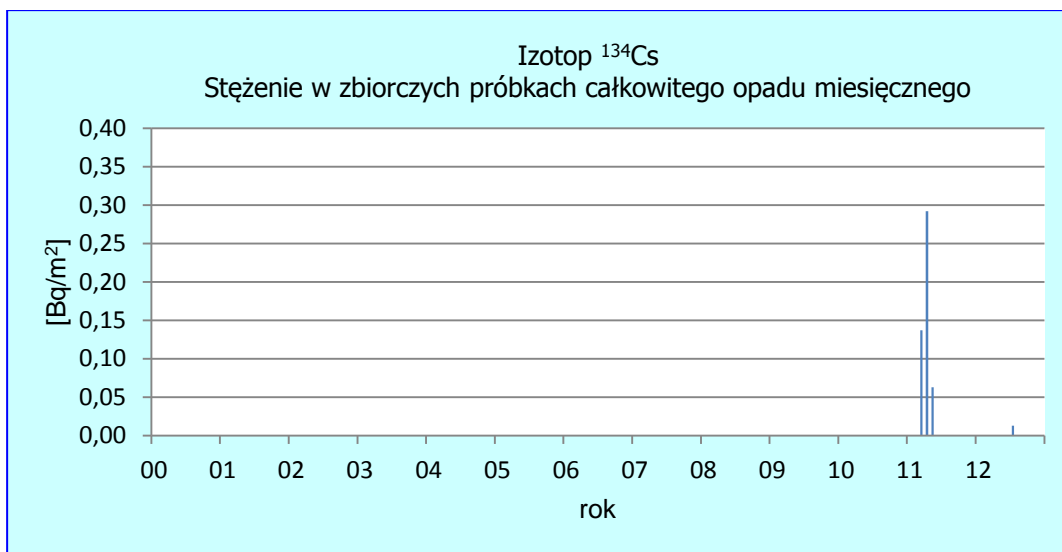
3.4.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian

Z porównania wyników analiz stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego uzyskanych w latach 2000-2012 wynika, że wzrost stężeń w okresie wiosenno-letnim jest powtarzalny (Rys. 61). Maksymalne stężenia ^{137}Cs w omawianym okresie odnotowano w 2011 roku jako efekt dopływu bardziej skażonych mas powietrza po awarii elektrowni atomowej Fukushima Daichii, która miała miejsce w marcu 2011 w Japonii. Potwierdzeniem tego jest również znaczny wzrost stężeń ^{134}Cs w tym samym okresie

(Rys. 62), podczas gdy w latach poprzednich wartości pozostawały poniżej progu detekcji stosowanej metody analitycznej. Zanotowana jednorazowa wartość ^{134}Cs w maju 2012 jest bardzo niska i jest pozostałością po awarii w Japonii.



Rys.61. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2012.



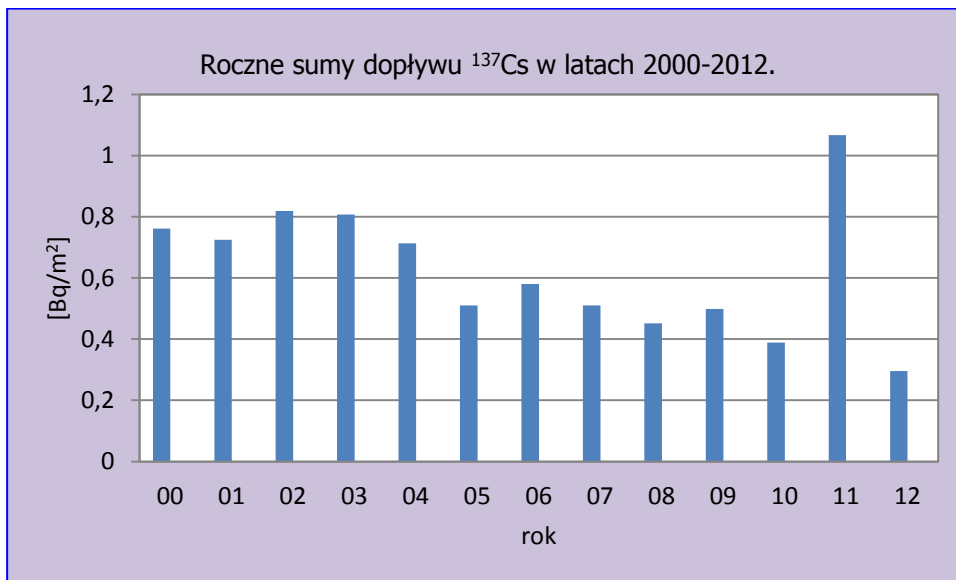
Rys.62. Stężenie promieniotwórcze ^{134}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2012.

Roczny dopływ ^{137}Cs z atmosfery przypadający na metr kwadratowy powierzchni obliczony jako suma stężeń promieniotwórczych wyznaczonych dla poszczególnych miesięcy wynosił w 2012 roku $0,296 \text{ Bq m}^{-2}$ i był najniższy w porównaniu do wartości wyliczonych dla okresu od 2000 do 2011 (Tabela 16). Pomijając rok 2011, w którym wzrost dopływu izotopów cezu z atmosfery był wynikiem awarii elektrowni w Fukushima, w omawianym okresie roku 2012 obserwuje się systematyczny spadek sumarycznego dopływu ^{137}Cs z atmosfery (Rys. 63).

Zmierzone wartości ww. izotopów pochodzenia sztucznego są bardzo niskie i będą systematycznie spadać pod warunkiem braku awarii w kolejnych latach.

Tabela 16. Roczna suma aktywności ^{137}Cs w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2012 Bq m^{-2} .

| Rok | ^{137}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 |
| 2012 | 0,296 |
| Średnia | 0,625 |
| Minimalna | 0,296 |
| Maksymalna | 1,067 |



Rys.63. Roczne sumy dopływu ^{137}Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2012.

Izotopy naturalne (Ra-226, Be-7, Ac-228, K-40).

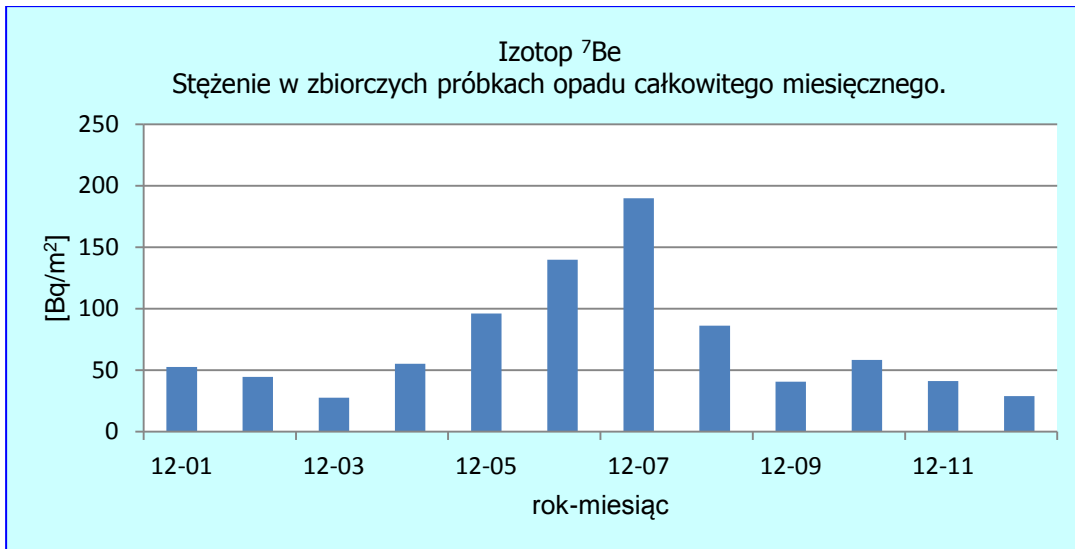
W 2012 roku, w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego oznaczano również stężenia promieniotwórcze izotopów pochodzenia naturalnego: ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac i ^{40}K . Najwyższą aktywnością charakteryzował się ^7Be , którego stężenia zmieniały się w zakresie od 27,5 do 189,7 Bq m⁻² (Tabela 17, Rys. 64). Średnie stężenie w roku 2012 wynosiło 71,7 Bq m⁻², a roczny dopływ (obliczony jako suma wartości miesięcznych) wynosił 859,9 Bq m⁻² i był wyższy od średniej z okresu 2000 - 2012 (691,5 Bq m⁻²) – Tabela 19. Stężenia ^{40}K zmieniały się w zakresie od 0,6 do 2,5 Bq m⁻², a roczny dopływ wynosił 20,5 Bq m⁻² i był wyższy zarówno w porównaniu do średniej z lat 2000 – 2012 (17,8 Bq m⁻²), jak i wartości obserwowanej w roku poprzednim (16,7 Bq m⁻²). Średnie stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra w 2012 roku wynosiło 0,13 Bq m⁻², a suma roczna wynikająca z wartości miesięcznych wynosiła 1,39 Bq m⁻², co oznaczało dwukrotny wzrost w stosunku do roku poprzedniego (0,66 Bq m⁻²) i spadek w stosunku do wartości średniej wyznaczonej dla omawianego okresu (1,84 Bq m⁻²). Najniższymi stężeniami promieniotwórczymi zmieniającymi się w zakresie od 0,03 do 0,07 Bq m⁻² charakteryzował się ^{228}Ac .

W przypadku wszystkich izotopów obserwowano niższe aktywności w miesiącach zimowych, szczególnie wzrost stężeń zaznaczył się w sezonie letnim w przypadku ^7Be (Rys. 64-67).

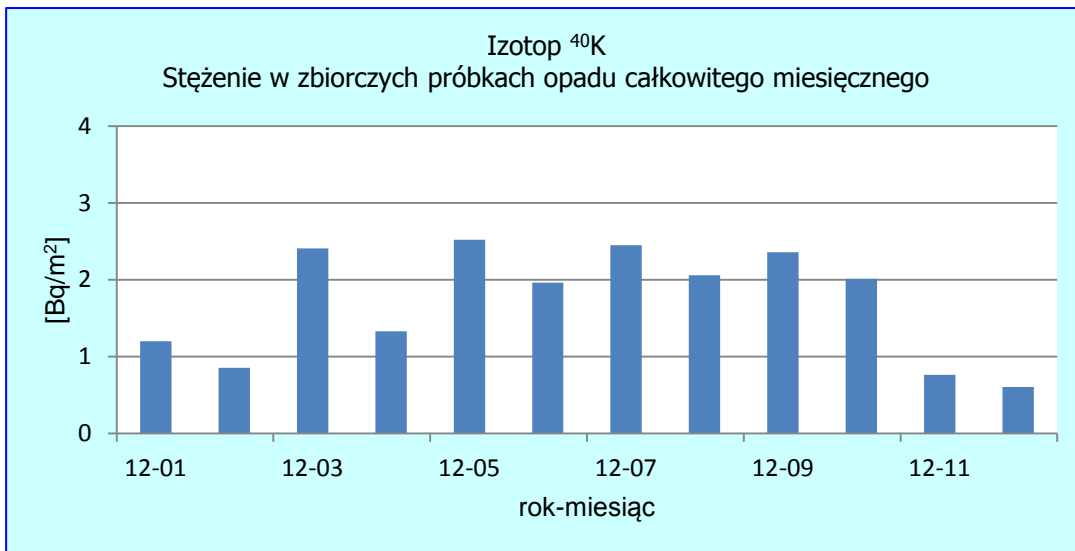
Zgodnie z oczekiwaniami, brak jest w przypadku izotopów pochodzenia naturalnego widocznych trendów zmian stężeń promieniotwórczych w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego (Rys. 68, 69), jak również w rocznych dopływach (Tabela 18.).

Tabela 17. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac i ^{40}K w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2012 r. w Bq m⁻².

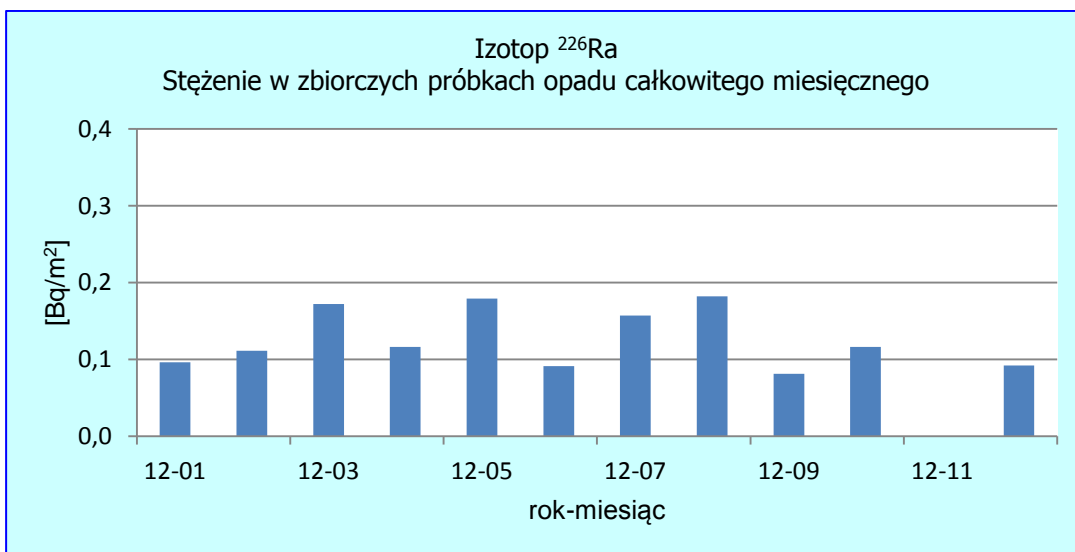
| Lp. | Miesiąc | ^7Be | ^{40}K | ^{226}Ra | ^{228}Ac |
|-----|-------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1 | Styczeń | 52,5 ± 0,7 | 1,20 ± 0,12 | 0,096 ± 0,064 | 0,027 ± 0,013 |
| 2 | Luty | 44,5 ± 0,7 | 0,85 ± 0,11 | 0,111 ± 0,053 | 0,031 ± 0,013 |
| 3 | Marzec | 27,5 ± 0,4 | 2,41 ± 0,16 | 0,172 ± 0,062 | 0,069 ± 0,015 |
| 4 | Kwiecień | 55,2 ± 0,9 | 1,33 ± 0,13 | 0,116 ± 0,058 | 0,049 ± 0,014 |
| 5 | Maj | 96,0 ± 1,2 | 2,52 ± 0,16 | 0,179 ± 0,067 | 0,062 ± 0,016 |
| 6 | Czerwiec | 139,7 ± 1,7 | 1,96 ± 0,14 | 0,091 ± 0,064 | 0,057 ± 0,015 |
| 7 | Lipiec | 189,7 ± 2,1 | 2,45 ± 0,16 | 0,157 ± 0,077 | 0,056 ± 0,014 |
| 8 | Sierpień | 86,1 ± 1,2 | 2,06 ± 0,15 | 0,182 ± 0,067 | 0,057 ± 0,015 |
| 9 | Wrzesień | 40,7 ± 0,6 | 2,36 ± 0,15 | 0,081 ± 0,058 | 0,049 ± 0,014 |
| 10 | Październik | 58,3 ± 1,0 | 2,01 ± 0,15 | 0,116 ± 0,061 | 0,042 ± 0,015 |
| 11 | Listopad | 41,1 ± 0,6 | 0,76 ± 0,10 | - | 0,029 ± 0,012 |
| 12 | Grudzień | 28,8 ± 0,5 | 0,60 ± 0,11 | 0,092 ± 0,061 | - |
| | Suma roczna | 859,9 | 20,50 | 1,393 | 0,528 |
| | Średnia | 71,7 | 1,71 | 0,127 | 0,048 |
| | Maksymalna | 189,7 | 2,52 | 0,182 | 0,069 |
| | Minimalna | 27,5 | 0,602 | 0,081 | 0,027 |



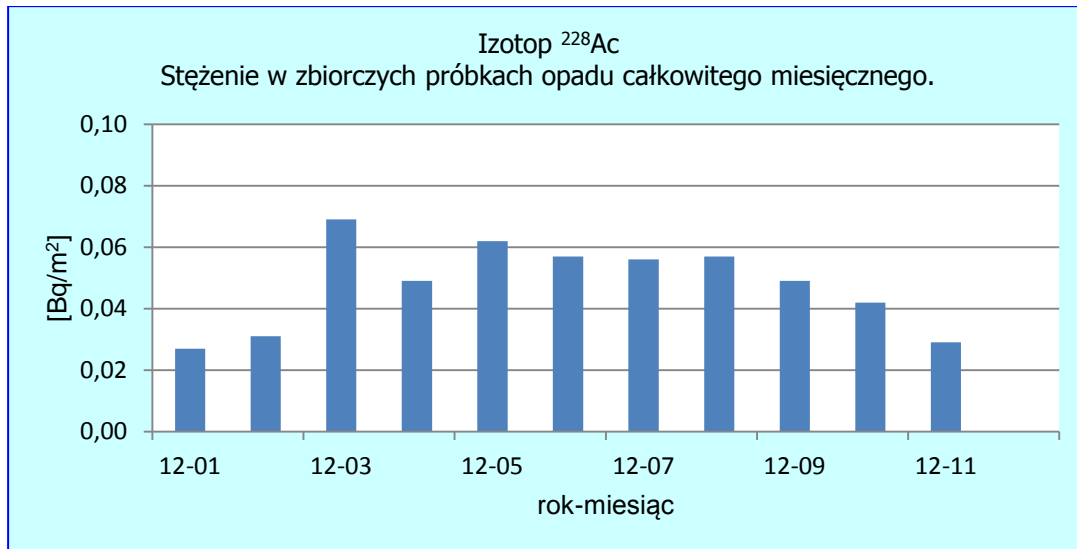
Rys. 64. Stężenie promieniotwórcze ^7Be w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego.



Rys.65. Stężenie promieniotwórcze ^{40}K w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego.



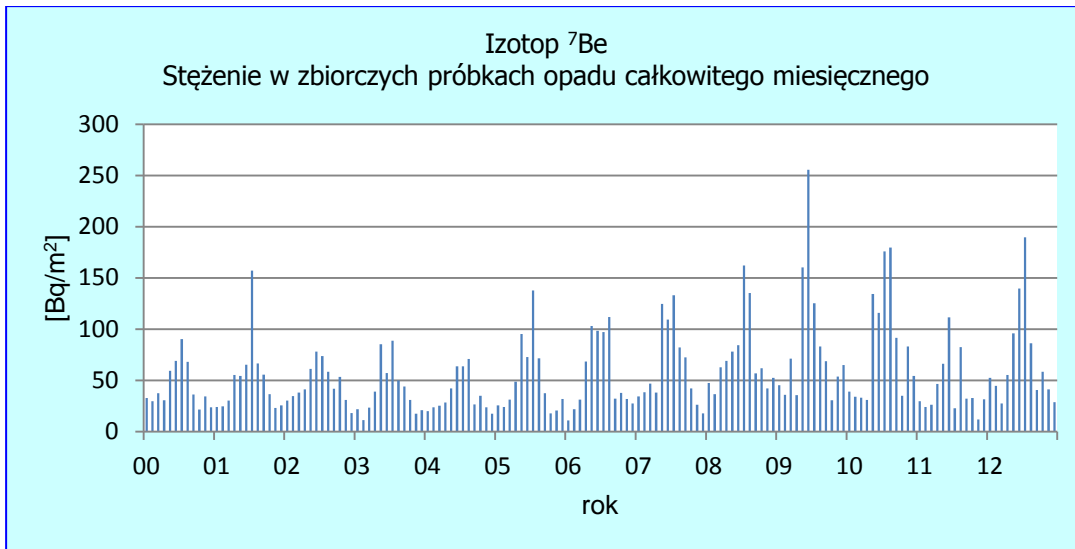
Rys.66. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego.



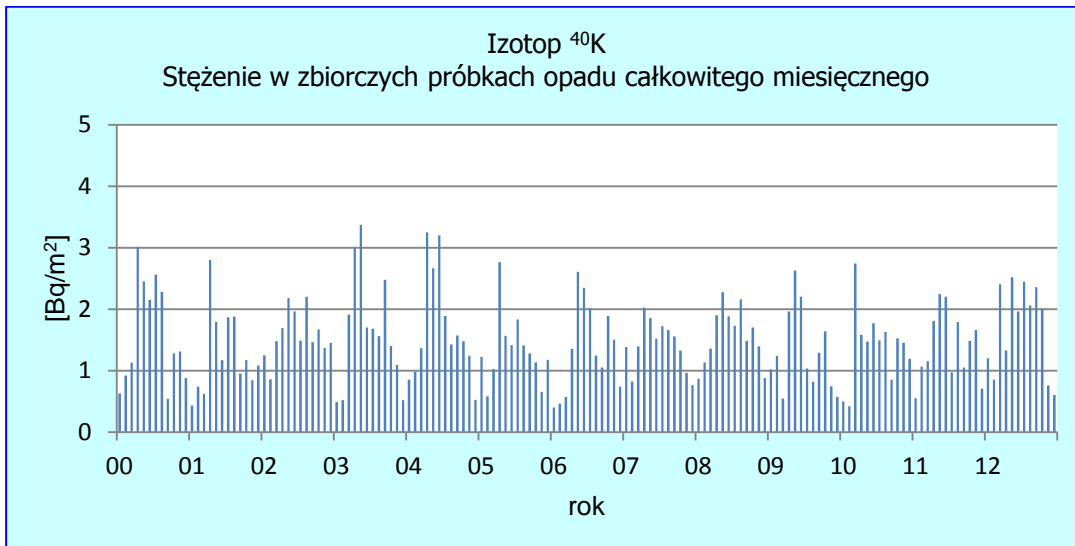
Rys. 67. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego.

Tabela 18. Roczna suma aktywności ^{226}Ra , ^7Be , ^{228}Ac , ^{40}K w zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2012, Bq m⁻²

| Rok | ^7Be | ^{40}K | ^{226}Ra | ^{228}Ac |
|-------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 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 | 614,147 | 16,064 | 2,584 | 0,402 |
| 2006 | 670,895 | 16,184 | 1,068 | 0,450 |
| 2007 | 764,630 | 16,991 | 1,299 | 0,493 |
| 2008 | 888,322 | 18,764 | 1,817 | 0,614 |
| 2009 | 1029,896 | 15,692 | 1,414 | 0,676 |
| 2010 | 1005,669 | 16,629 | 0,814 | 0,366 |
| 2011 | 517,800 | 16,686 | 0,659 | 0,194 |
| 2012 | 859,883 | 20,504 | 1,393 | 0,528 |
| Średnia | 691,541 | 17,786 | 1,836 | 0,465 |
| Minimalna | 439,582 | 15,340 | 0,659 | 0,194 |
| Maksymalna | 1029,896 | 20,504 | 2,974 | 0,676 |



Rys. 68. Stężenie promieniotwórcze ${}^7\text{Be}$ w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2012.



Rys. 69. Stężenie promieniotwórcze ${}^{40}\text{K}$ w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2012.

3.5. Aktywność Sr-90 w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego

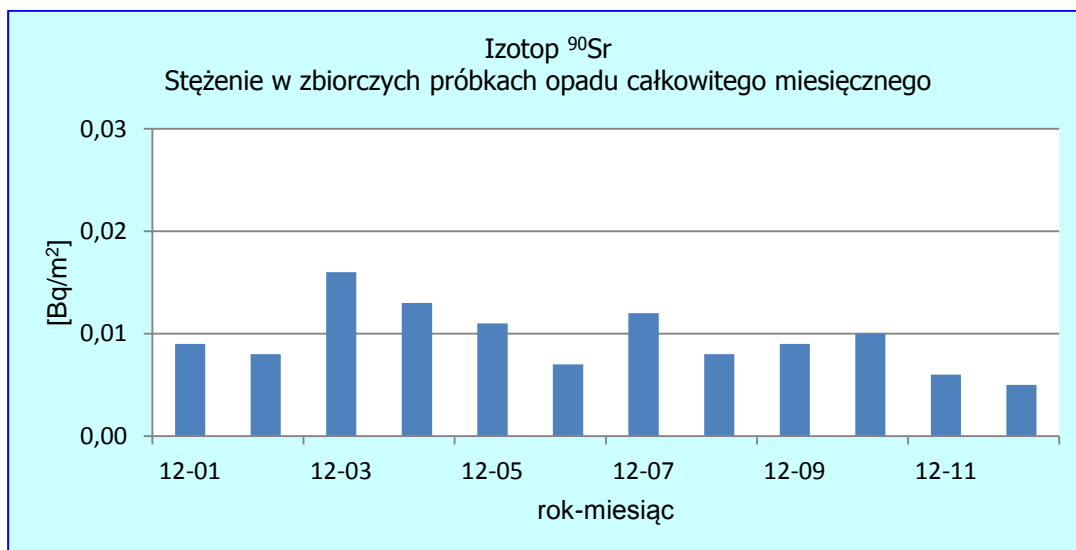
3.5.1 Analiza wyników uzyskanych w roku 2012

W 2012 roku, podobnie jak w latach ubiegłych w zbiorczych (pochodzących z 9 stacji) próbkach całkowitego opadu miesięcznego prowadzono pomiary stężeń promieniotwórczych (aktywność odniesiona do powierzchni) antropogenicznego izotopu strontu – ^{90}Sr , który podobnie jak ^{137}Cs charakteryzuje się stosunkowo długim czasem połowicznego rozpadu (28 lat).

W przypadku ^{90}Sr najniższe stężenia wystąpiły również w miesiącach zimowych ($0,006 \text{ Bq m}^{-2}$ i $0,005 \text{ Bq m}^{-2}$ odpowiednio w listopadzie i grudniu) – Tabela 19, Rys. 70. Najwyższa wartość wynosząca $0,016 \text{ Bq m}^{-2}$ została zidentyfikowana w marcu. Stężenia promieniotwórcze przekraczające wartość $0,010 \text{ Bq m}^{-2}$ charakteryzowały opad w kwietniu, maju oraz lipcu.

Tabela 19. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego w 2012 r.

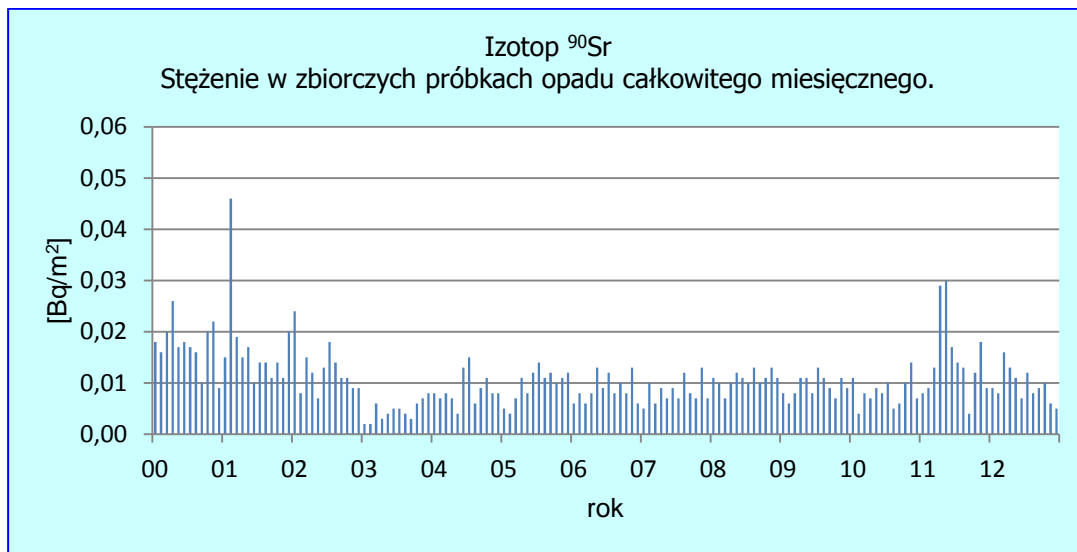
| Lp. | Miesiąc | ^{90}Sr [Bq m^{-2}] |
|-----|-------------|---|
| 1 | Styczeń | $0,009 \pm 0,003$ |
| 2 | Luty | $0,008 \pm 0,002$ |
| 3 | Marzec | $0,016 \pm 0,003$ |
| 4 | Kwiecień | $0,013 \pm 0,003$ |
| 5 | Maj | $0,011 \pm 0,003$ |
| 6 | Czerwiec | $0,007 \pm 0,002$ |
| 7 | Lipiec | $0,012 \pm 0,003$ |
| 8 | Sierpień | $0,008 \pm 0,003$ |
| 9 | Wrzesień | $0,009 \pm 0,003$ |
| 10 | Październik | $0,010 \pm 0,003$ |
| 11 | Listopad | $0,006 \pm 0,003$ |
| 12 | Grudzień | $0,005 \pm 0,003$ |
| | Suma roczna | 0,114 |
| | Średnia | 0,010 |
| | Maksymalna | 0,016 |
| | Minimalna | 0,005 |



Rys. 70. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego.

3.5.2 Porównanie wyników z danymi z lat ubiegłych, określenie zmian

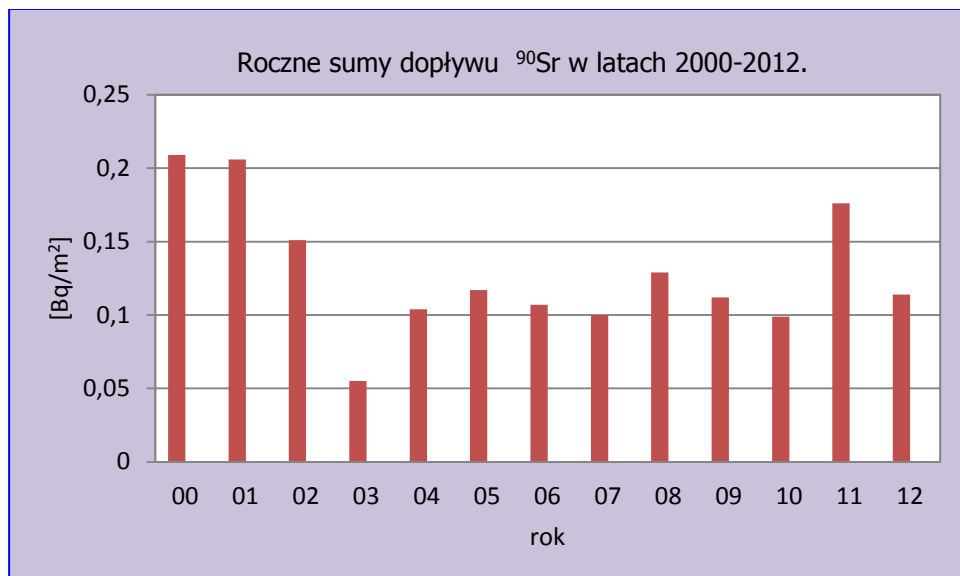
Z porównania wyników analiz stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego uzyskanych w latach 2000-2012 (Rys. 71) wynika, że największe miesięczne aktywności ^{90}Sr obserwowano w latach 2000 – 2003 i następnie w 2011 roku w wyniku dopływu związanego z awarią w Fukushima. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w sumarycznym rocznym dopływie, który w latach 2000 i 2001 był na poziomie $0,200 \text{ Bq m}^{-2}$, natomiast w 2011 roku wynosił $0,176 \text{ Bq m}^{-2}$ (Tabela 20, Rys. 72). W 2012 spadł do $0,114 \text{ Bq m}^{-2}$, a minimalna wartość dopływu w omawianym okresie wynosiła $0,055 \text{ Bq m}^{-2}$. Jednocześnie brak jest w przypadku ^{90}Sr jednoznacznych kierunków zmian.



Rys. 71. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2012.

Tabela 20. Roczna suma aktywności ^{90}Sr w miesięcznym zbiorczym opadzie całkowitym w latach 2000-2012.

| 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 |
| Średnia | 0,129 |
| Minimalna | 0,055 |
| Maksymalna | 0,209 |



Rys.72. Roczne sumy dopływu ⁹⁰Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego w latach 2000-2012.

4. Wnioski

W 2012 roku poziom promieniotwórczości w przyziemnej warstwie atmosfery związany z obecnością izotopów promieniotwórczych sztucznych i naturalnych nie odbiegał w sposób zasadniczy od poziomu, który obserwowano w latach poprzednich.

Wartość średniej mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu wyznaczona na podstawie danych dobowych zmierzonych na 9 stacjach w 2012 roku wynosiła $91,8 \text{ nGy h}^{-1}$ i była zbliżona do wartości obserwowanych w okresie 2000-2011. Najniższe wartości w ciągu całego roku rejestrowano na stacji Włodawa (roczna wartość średnia wynosiła $61,5 \text{ nGy h}^{-1}$), najwyższe natomiast na stacji Zakopane z wartością średnią $115,4 \text{ nGy h}^{-1}$. Zróżnicowanie wartości mocy dawki na obszarze Polski wynikało głównie z lokalizacji stacji rejestrujących.

Stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie alfa w aerozolach zawieszonych w powietrzu, zarówno pochodzenia naturalnego, jak i sztucznego pozostały na poziomie bardzo zbliżonym do lat poprzednich. Średnie roczne aktywności wynosiły odpowiednio $6,0 \text{ Bq m}^{-3}$ i $0,029 \text{ Bq m}^{-3}$, co oznacza, że poziom promieniowania alfa pochodzenia sztucznego stanowił tylko ok. 5% poziomu radioaktywności związanego z promieniowaniem alfa ze źródeł naturalnych.

W 2012 stężenia promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie beta w aerozolach zmieniały się w bardzo szerokim zakresie od średniej wartości rocznej równej $0,005 \text{ Bq m}^{-3}$ obserwowanej w Mikołajkach do wartości $0,403$ na stacji Świnoujście. Jednocześnie wartość średnia roczna obliczona na podstawie danych ze wszystkich stacji była najwyższa w okresie 2000 – 2012 i wynosiła $0,160 \text{ Bq m}^{-3}$, przekraczając prawie trzykrotnie wartość średnią dla omawianego okresu ($0,057 \text{ Bq m}^{-3}$).

Najmniejsza średnia roczna wartość globalnej aktywności beta charakteryzowała całkowity opad dobowy zbierany na stacji Świnoujście ($0,4 \text{ Bq m}^{-2}$). Najwyższe wartości ($1,1 \text{ Bq m}^{-2}$) wyznaczono na stacjach Mikołajki, Legnica i Zakopane. Sumaryczna aktywność beta, opisująca dopływ izotopów emitujących promieniowanie beta do powierzchni ziemi, charakterystyczna dla całego obszaru Polski, obliczona jako suma wszystkich stężeń dobowych rejestrowanych na wszystkich stacjach w 2012 roku wyniosła $0,32 \text{ kBq m}^{-2}\text{rok}^{-1}$ i była identyczna z wartością średnią wyznaczoną dla okresu 2000-2012.

Średnia aktywność beta wody opadowej charakterystyczna dla 2012 roku wynosiła 342 mBq l^{-1} i była bardzo zbliżona do wartości obserwowanych w latach 2000-2011. Wartość średnia dla tego okresu wyniosła 351 mBq l^{-1} .

Stężenie promieniotwórcze izotopów emitujących promieniowanie beta w miesięcznych próbkach opadu całkowitego zmieniały się w dość szerokim zakresie ($2 - 19 \text{ Bq m}^{-2}$). Najniższe wartości w ciągu całego roku rejestrowano na stacji Świnoujście. Jednocześnie średnia aktywność beta w miesięcznym opadzie całkowitym obliczona na podstawie danych ze wszystkich stacji, charakterystyczna dla roku 2012 ($7,3 \text{ Bq m}^{-2}$) była zbliżona do wartości średniej obliczonej dla okresu 2000-2012 ($6,9 \text{ Bq m}^{-2}$).

Roczny dopływ ^{137}Cs z atmosfery przypadający na metr kwadratowy powierzchni obliczony jako suma stężeń promieniotwórczych wyznaczonych dla poszczególnych miesięcy wynosił w 2012 roku $0,296 \text{ Bq m}^{-2}$ i był najniższy w porównaniu do wartości wyliczonych dla okresu lat 2000 do 2011. Pomijając rok 2011, w którym wzrost dopływu izotopów cezu z atmosfery był wynikiem awarii elektrowni w Fukushima, w omawianym okresie obserwuje się systematyczny spadek sumarycznego dopływu ^{137}Cs z atmosfery.

Roczna suma stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w opadzie całkowitym wynosiła w 2012 roku $0,114 \text{ Bq m}^{-2}$ i była tylko nieznacznie niższa od wartości średniej wyznaczonej dla okresu 2000 – 2012 ($0,129 \text{ Bq m}^{-2}$).

W przypadku pozostały izotopów pochodzenia naturalnego emitujących promieniowanie gamma wartości stężeń promieniotwórczych w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego nie odbiegały w sposób znaczący wartości rejestrowanych w latach poprzednich.

Zarówno stężenia izotopów beta promieniotwórczych w aerozolach, jak i w miesięcznych próbkach opadu całkowitego oraz stężenia promieniotwórcze izotopów: ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^7Be , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ac w zbiorczych próbkach miesięcznego opadu całkowitego wykazywały zmiany sezonowe wskazując na wzrost aktywności obserwowany w okresie wiosenno-letnim.

5. Podsumowanie

Monitoring radioaktywności przyziemnej warstwy powietrza prowadzono w roku 2012 w ramach Umowy nr 2/2011/F pomiędzy Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska a Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytutem Badawczym

Pomiar prowadzono na stacjach sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych działających w ramach infrastruktury IMGW. Stacje IMGW zlokalizowane są w Warszawie, Gdyni, Włodawie, Świnoujściu, Gorzowie Wlkp., Poznaniu², Lesku, Zakopanem, Legnicy i Mikołajkach.

Rodzaj pomiarów i zestawienie wyników uzyskanych w roku 2012³.

| Lp. | Rodzaj pomiaru | Wartość minimalna | Wartość maksymalna | Wartość średnia | Suma roczna |
|-----|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. | Moc dawki promieniowania gamma. Wartości na poziomie tła | 61,5 nGy/h | 115,4 nGy/h | 91,8 nGy/h | Nie dotyczy |
| 2. | Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia naturalnego w aerozolach powietrza Wartości na poziomie tła | 2,57 Bq/m ³ | 8,53 Bq/m ³ | 6,0 Bq/m ³ | Nie dotyczy |
| 3. | Stężenie promieniotwórcze izotopów alfa pochodzenia sztucznego w aerozolach Wartości na poziomie tła | 0,006 Bq/m ³ | 0,078 Bq/m ³ | 0,029 Bq/m ³ | ND |
| 4. | Stężenie promieniotwórcze izotopów beta pochodzenia sztucznego w aerozolach powietrza Wartości na poziomie tła | 0,005 Bq/m ³ | 0,403 Bq/m ³ | 0,160 Bq/m ³ | ND |
| 5. | Globalna aktywność beta całkowitego opadu dobowego oraz roczna suma aktywności beta całkowitego opadu dobowego. Wartości na poziomie tła | 0,4 Bq/m ² | 1,1 Bq/m ² | 0,9 Bq/m ² | 323 Bq/m ² |
| 6. | Globalna aktywność beta wody opadowej Wartości na poziomie tła | 149,9 Bq/litr | 478,2 Bq/litr | 341,5 Bq/litr | ND |
| 7. | Globalna aktywność beta całkowitego opadu miesięcznego oraz roczna suma aktywności beta całkowitego opadu miesięcznego Wartości na poziomie tła | 2 Bq/m ² | 19 Bq/m ² | 7,3 Bq/m ² | ND |
| 8. | Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą | 0,008 Bq/m ² | 0,057 Bq/m ² | 0,025 Bq/m ² | 0,296 Bq/m ² |
| 9. | Stężenie promieniotwórcze ¹³⁴ Cs w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego Bardzo niskie wartości na poziomie zdolności detekcyjnych aparatury | 0,013 Bq/m ² | 0,013 Bq/m ² | 0,013 Bq/m ² | 0,013 Bq/m ² |
| 10. | Stężenie promieniotwórcze ⁹⁰ Sr w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. Bardzo niskie wartości z tendencją malejącą | 0,005 Bq/m ² | 0,016 Bq/m ² | 0,010 Bq/m ² | 0,114 Bq/m ² |
| 12. | Sumy roczne aktywności ⁷ Be, ⁴⁰ K, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ac w zbiorczych próbkach całkowitego opadu miesięcznego. Wartości na poziomie tła | Be-7 | K-40 | Ra-226 | Ac-228 |
| | | 859,9 Bq/m ² | 20,5 Bq/m ² | 1,4 Bq/m ² | 0,53 Bq/m ² |

² Z racji uzupełniającego się programu pomiarowego stacja Gorzów Wlkp. oraz Poznań są traktowane jako jedna stacja.

³ Suma roczna dotyczy tylko wyników spektrometrycznych oraz opadu całkowitego dobowego.

Część II

Syntetyczne opracowanie informacji dla ogółu społeczeństwa (dla osób niezwiązanych bezpośrednio z pomiarami radioaktywności) o stanie radiacyjnym powietrza w kraju w oparciu o dane pomiarowe z części I

Radioaktywność (promieniotwórczość): to zdolność jąder atomowych do rozpadu promieniotwórczego, który najczęściej jest związany z emisją cząstek alfa, cząstek beta oraz promieniowania gamma.

Szczególnym rodzajem promieniotwórczości jest rozszczepienie jądra atomowego, podczas którego radioaktywne jądro rozpada się na dwa lub więcej fragmentów oraz emituje liczne cząstki, między innymi neutrony, które mogą indukować rozszczepienia w sąsiednich jądrach. Zjawisko takiej reakcji łańcuchowej jest wykorzystane w bombach jądrowych oraz w sposób kontrolowany w elektrowniach jądrowych.

Promieniowanie towarzyszące przemianom jądrowym (zarówno elektromagnetyczne jak i w postaci strumienia cząstek) przechodząc przez substancję ośrodka powoduje jonizację (wybijanie elektronów z orbit w atomach). Promieniowanie to, po przekroczeniu pewnego poziomu, ma szkodliwy wpływ na żywe organizmy. Narażenie się na dużą dawkę promieniowania może spowodować choroby.

Źródłami radioaktywności są niestabilne izotopy pierwiastków, zarówno występujących w naturze, jak i wytworzonych przez człowieka. Do najbardziej znaczących należą:

- H-3, wytwarzany m.in. w wyniku eksperymentów termojądrowych, a także w wyniku reakcji jądrowych zachodzących w atmosferze
- C-14, stale produkowany przez promieniowanie kosmiczne w górnych warstwach atmosfery, obecny we wszystkich organizmach żywych, w tym w ciele człowieka
- K-40, obecny m.in. w minerałach i kościach, stanowiący 0,0117% całej zawartości potasu
- Rn, krótko żyjący element tzw. szeregów promieniotwórczych; jest gazem, więc może uwalniać się z miejsca powstania, np. z gleby, materiałów budowlanych itp.; największe znaczenie ma ²²²Rn, pochodzący z szeregu ²³⁸U, jego okres połowicznego zaniku wynosi 3,8 dnia
- Ra, także pierwiastek występujący w szeregach promieniotwórczych; największe znaczenie ma izotop Ra-226 z szeregu U-238, którego okres połowicznego zaniku wynosi 1599 lat
- Th-232, długo żyjący izotop obecny w niektórych minerałach i w glebie
- U, występujący w minerałach i w glebie; największe znaczenie mają: ²³⁸U, mniej obfity izotop ²³⁵U oraz sztucznie uzyskany ²³³U – dzięki podatności na rozszczepienie są wykorzystywane w reaktorach i bombach jądrowych
- Pu, uzyskiwany sztucznie z uranu; izotop Pu-239, także podatny na rozszczepienie, stosowany jest podobnie jak uran.

Radioaktywność tych i wielu innych izotopów ma zastosowania w medycynie (diagnostyka, terapia nowotworów), archeologii i geologii (datowanie izotopowe), technice oraz badaniach naukowych.

Czytelnik bardziej zainteresowany edukacyjnym ujęciem tematu promieniotwórczości powinien sięgnąć do broszury Pt. „Promieniowania w środowisku człowieka” oraz innych znajdujących się na stronie Państwowej Agencji Atomistyki⁴ w dziale „Informacja i edukacja”.

Słownik użytych pojęć i terminów:

- Promieniowanie alfa, cząstki alfa - atomu helu pozbawione powłok elektronowych powstające podczas reakcji jądrowych. Składają się z dwóch protonów i dwóch elektronów.
- Promieniowanie beta - elektrony powstające w wyniku reakcji jądrowych jak np. zderzeń jąder atomowych z cząstkami.
- Promieniowanie gamma i X - fale elektromagnetyczne o częstotliwości rzędu 10^{18} Hz, fale elektromagnetyczne posiadające właściwości nie tylko fal ale też cząstek, zdolnych do wybijania z atomów różnych cząstek elementarnych.

⁴ <http://www.paa.gov.pl/>

- Promieniowania kosmiczne - promieniowanie jonizujące składające się z cząstek pierwotnych pochodzenia pozaziemskiego charakteryzujących się wysoką energią i cząstek wtórnych wytworzonych w wyniku wzajemnego oddziaływania cząstek pierwotnych z atmosferą.
- Aktywność - ilość reakcji jądrowych (związanych z emisją cząstek, jąder atomowych oraz promieniowania gamma) w jednostce czasu.
- Bq - czytamy Bekerel, jednostka rozpadu promieniotwórczego mówiąca o rozpadzie jednego jądra atomu w ciągu sekundy, określamy tak ilościowo stopień radioaktywności danego izotopu, np. 5 Bq oznacza 5 rozpadów jąder w ciągu sekundy.
- Promieniowanie jonizujące - promieniowanie alfa, beta, gamma lub X wywołujące skutki fizyczne w materii jak np. wybijanie elektronów z powłok atomowych.
- Moc dawki promieniowania gamma - ilość energii promieniowania jonizującego przekazana jednostce masy w jednostce czasu
Moc dawki promieniowania gamma mierzymy w J/kg*s (jednostka podstawowa dżul na kilogram na sekundę)
- Dawka promieniowania - ilość energii jonizującego promieniowania pochłonięta w jednostce masy, dawkę mierzymy w J/kg (dżulach na kilogram)
- Jednostka podstawowa mocy dawki to Gy/h, czytamy, jako (grej na godzinę) i interpretujemy, jako działanie przez 1 godzinę, promieniowania gamma o energii 1 J (1 dżula – jednostki energii) na kilogram. Zamiennikiem dla Gy/h jest Sv/h (Siwert na godzinę). Sv/h odnosi do efektów na materię żywą. W przypadku promieniowania gamma 1 Gy = 1 Sv
- nGy lub nSv – nanoGrej lub nanoSiwert, oznacza jedną miliardową część Gy lub Sv
- mGy lub mSv – miliGrej/miliSiwert, oznacza jedną tysięczną część Gy lub Sv.
- Izotop, nuklid - odmiany tego samego pierwiastka różniące się liczbą neutronów w jądrze
- Radioizotop, radionuklid radioaktywne izotopy, nuklidy ulegające samorzutnemu rozpadowi na inne pierwiastki i emitujące podczas tych procesów cząstki elementarne i fale elektromagnetyczne gamma.
- Opad całkowity - opad pierwiastków promieniotwórczych z wyższych warstw atmosfery na powierzchnię ziemi,
- Aktywność opadu całkowitego mierzymy go za pomocą ilości rozpadów promieniotwórczych na jednostkę powierzchni czyli Bq/m² oraz krotności czyli kBq/m² (1 kBq/m² = 1000 Bq/m²)
- Aerozole powietrza - płynne i stałe radioaktywne cząstki zawierające radioizotopy znajdujące się/zawieszone w powietrzu. Aktywność aerozoli mierzymy w Bq/m³ (oraz krotnościach), co oznacza ilość rozpadów promieniotwórczych w metrze sześciennym.
- Pomiar spektrometryczny – pomiar rozkładu energii promieniowania gamma emitowanej przez daną substancję w celu wykrycia zawartych w niej izotopów (pomiar ilościowy i/lub jakościowy)
- Cs-137 – Izotop cezu
- Sr-90 – Izotop strontu
- Be-7 – Izotop berylu
- Ra-226 – Izotop radu
- Ac-228 – Izotopu aktynu
- K-40 – Izotop potasu
- U-233, U-238 – Izotopy uranu
- Th-232 – Izotop toru
- Pu-239- Izotop plutonu
- Rn-222 – Izotopu radonu
- H-3, Tryt – Izotop wodoru
- C-14 – Izotop węgla

I. Radioaktywność naturalna w środowisku - wprowadzenie

W naszym życiu mamy styczność z promieniotwórczością naturalną oraz sztuczną wytworzoną przez człowieka i wprowadzoną do środowiska. Trzeba zaznaczyć, że promieniotwórczość jest nieodłącznym składnikiem naszego życia i środowiska. Pochodzenie promieniotwórczości naturalnej jest związane z oddziaływaniem promieni kosmicznych na jądra atomów gazów w atmosferze oraz z radioizotopami znajdującymi się w skorupie ziemskiej i glebie. W wyniku oddziaływania promieni kosmicznych na jądra atmosferycznego azotu, tlenu i argonu powstają nowe izotopy radioaktywne.

Skaly skorupy ziemskiej zawierają radiopierwiastki stanowiące trzy tzw. rodziny promieniotwórcze, w których zachodzą długie tzw. szeregi przemian jądrowych tzn. jednych atomów w inne. W czasie tych przemian w środkowej części każdego szeregu powstaje radionuklid, który w warunkach atmosferycznych ma postać gazu. Gazami tymi są rad, tor i aktynon należące do grupy gazów szlachetnych. Dzięki postaci gazowej pierwiastki przedostają się poprzez pory z powierzchni ziemi do atmosfery. Dodatkowo każdy rejon ma inny poziom promieniowania naturalnego z powodu właśnie różnic geologicznych i związanej z tym różnej zawartości izotopów naturalnych w środowisku. I tak np. na terenach górzystych obserwujemy zwiększone naturalne promieniowanie gamma z racji skalnego podłoża oraz otoczenia.

Stacje Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu badawczego⁵ działają w służbie pomiarów skażeń promieniotwórczych już od ponad 50 lat.

Stacje IMGW prowadzące pomiar poziomu radioaktywności w przyziemnej warstwie powietrza zlokalizowane są obecnie w Warszawie, Gdyni, Mikołajkach, Gorzowie Wlkp., Poznaniu, Świnoujściu, Legnicy, Włodawie, Zakopanem oraz w Lesku.

Przedstawmy teraz w postaci skondensowanej uzyskane w roku 2012 wyniki dla całej sieci pomiarowej wraz z interpretacją wyników oraz odniesieniem ich do poprzednich lat:

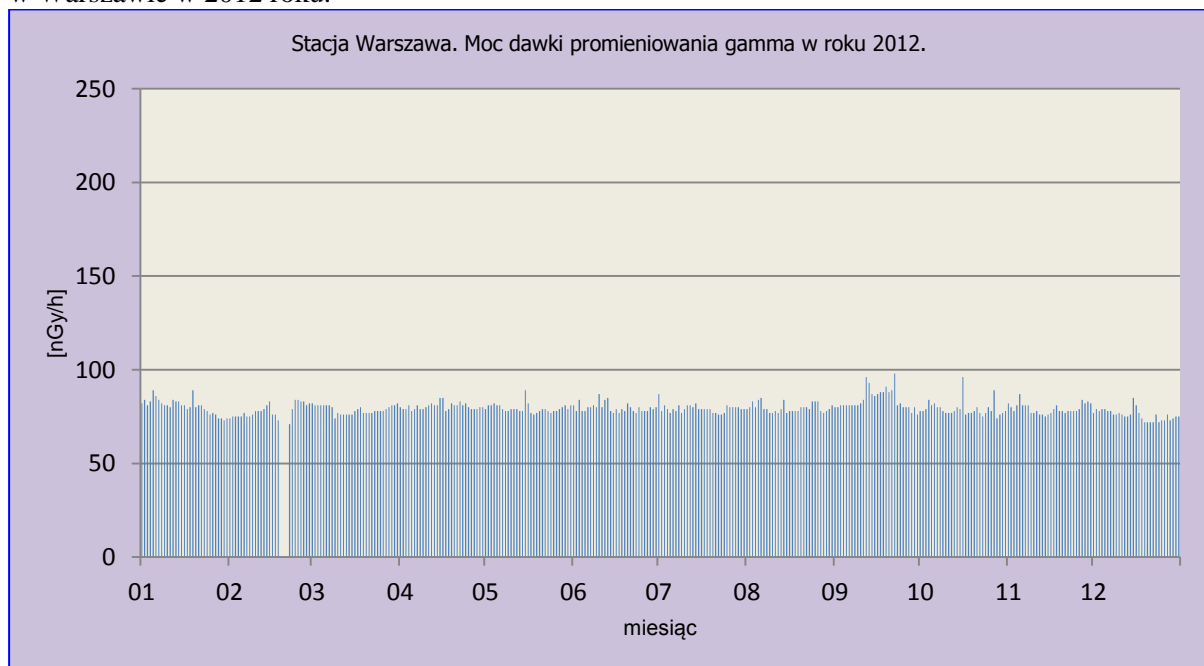
| Lp. | Rodzaj pomiaru | Opis pomiaru | Średnie roczna wartość w roku 2012 | Zakresy średnich rocznych w latach 2000-2012 | Interpretacja wyników |
|-----|---|---|--------------------------------------|--|---|
| 1. | Pomiar beta opadu całkowitego dobowego | Pomiar polega na wystawianiu na czas 24 godzin kuwet z wodą destylowaną. Następnie woda jest parowana na bibule i spalana. Mierzona jest aktywność otrzymanego popiołu. Średnia sumaryczna roczna aktywność beta opadu całkowitego (suma aktywności 366 próbek w ciągu roku): | 0,32 kBq/m² | 0,30 - 0,34 kBq/m² | Wyniki na poziomie tła. Nie stwierdzono skażeń. |
| 2. | Pomiar beta opadu całkowitego miesięcznego | Pomiar polega na wystawianiu kuwet z wodą destylowaną na okres 1 miesiąca. Następnie woda jest parowana na bibule i spalana. Mierzona jest aktywność otrzymanego popiołu. | 7,3 Bq/m² | 6,0 – 8,2 Bq/m² | Wyniki na poziomie tła. Nie stwierdzono skażeń. |
| 3. | Wyniki pomiarów radionuklidów | Pomiar radionuklidów naturalnych i sztucznych | Ac-228 – 0,5 Ra-226 – 1,4 | Ac-228: 0,2– 0,7 Bq/m² | Wyniki na poziomie tła. |

⁵ <http://www.imgw.pl> <http://pogodynka.pl>

| | | | | | |
|----|---|---|--|--|---|
| | naturalnych w opadzie całkowitym | polega na analizie spektrometrycznej zbiorczych próbek opadu miesięcznego w poszczególnych miesiącach. Średnie sumaryczne roczne aktywności radionuklidów naturalnych w opadzie całkowitym, mierzone metodami spektrometrycznymi. | Be-7 – 860 K-40 – 21 Bq/m² | Ra-226: 0,7 – 3,0 Bq/m² Be-7: 430-1030 Bq/m² K-40: 15-21 Bq/m² | Radionuklidy naturalnie występujące |
| 4. | Wyniki pomiarów mocy dawki promieniowania gamma | Pomiar jest dokonywany za pomocą sondy pomiarowej umiejscowionej ok. 1 metra nad ziemią. | 91,8 nGy/h | 89,6 - 99,1 nGy/h | Wyniki na poziomie tła. Nie stwierdzono skażeń. |
| | Wyniki pomiarów promieniowania aerozoli alfa naturalnych w powietrzu | Pomiar aerozoli sztucznych i naturalnych jest dokonywany za pomocą urządzeń zasysających powietrze na specjalny filtr. Następnie detektor półprzewodnikowy mierzy radioaktywność cząstek osadzonych na filtrze. | 6,0 Bq/m³ | 4,9 - 8,6 Bq/m³ | Wyniki na poziomie tła. Nie stwierdzono skażeń. |
| | | | | | |

Zmienność uzyskanych wartości promieniowania naturalnego wynika z procesów krążenia izotopów naturalnych w środowisku. Uzyskane wartości promieniowania są na poziomie naturalnego tła notowanego w poprzednich latach.

Poniżej przedstawiono wykres dla pomiarów mocy dawki promieniowania gamma uzyskanej w Warszawie w 2012 roku.



II. Radioaktywność sztuczna w środowisku – wprowadzenie

Sztuczne skażenie promieniotwórcze atmosfery powstaje w wyniku działalności człowieka w wielu obszarach działalności technicznej (medycznej, energetycznej etc.) Może również być efektem awarii reaktora jądrowego. Wybuchy jądrowe przeprowadzane w powietrzu w drugiej połowie XX wieku również miały istotny wkład w skażenie środowiska.

Więcej informacji o poziomach promieniotwórczości zmierzonych na obszarze kraju znajduje się w Raplocie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki pt. „OCENA STANU BEZPIECZEŃSTWA JĄDROWEGO I OCHRONY RADIOLOGICZNEJ W POLSCE W 2012 ROKU”.⁶

1. Wyniki pomiarów radionuklidów sztucznych w opadzie całkowitym.

Izotopy Cs-137, Cs-134 oraz Sr-90 są pozostałością eksperymentów jądrowych na powierzchni ziemi jak również pozostałością awarii w Czarnobylu jak oraz w Elektrowni Jądrowej Fukushima.

Sumy roczne aktywności radionuklidów sztucznych w opadzie całkowitym w roku 2012.

| Cs-137 | Cs-134 | Sr-90 |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,296 Bq/m ² | 0,013 Bq/m ² | 0,114 Bq/m ² |

2. Wyniki pomiarów promieniowania aerozoli alfa i beta sztucznych w powietrzu

Średnia wartość aktywności aerozoli alfa i beta sztucznych dla całej sieci stacji w 2012 r. wyniosła:

| Alfa sztuczne | Beta sztuczne |
|-------------------------|-------------------------|
| 0,029 Bq/m ³ | 0,160 Bq/m ³ |

3. Interpretacja wyników oraz odniesienie ich do poprzednich lat, określenie zmian

Dla porównania z pomiarami w roku 2012 przedstawmy zakresy sum roczne w pomiarach w latach 2000-2012 w pomiarach radionuklidów sztucznych w zbiorczym opadzie całkowitym:

| Cs-137 | Cs-134 | Sr-90 |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 0,296 - 1,067 Bq/m ² | Zmierzono tylko w 2011 i 2012 r. | 0,055 - 0,209 Bq/m ² |

Największe wartości izotopów Cs-zmierzono w roku 2011. Przyczyną tego zjawiska było pojawienie się w atmosferze produktów rozszczepienia pochodzących z Japonii. W przypadku izotopu Cs-134, jego wartości uzyskane przed 2010 rokiem były w granicach błędu pomiarowego dlatego też nie są miarodajne i zostały odrzucone. Przyczyną pojawienia się izotopu Cs-134 w roku 2012 była również awaria Elektrowni Atomowej w Japonii. Był to jednorazowy wynik zmierzony w kwietniu 2012 r.

Przejdźmy do przedstawienia zakresu wartości aktywności promieniowania aerozoli alfa i beta sztucznych zmierzonych w latach 2000-2012:

| Alfa sztuczne | Beta sztuczne |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 0,004-0,040 Bq/m ³ | 0,017-0,160 Bq/m ³ |

Porównując wartości z roku 2012 a także wartości z lat 2000-2012 można się zauważyć, że są to bardzo małe wartości (znacznie poniżej 1 Bq/m³) na poziomie tła.

⁶ <http://www.paa.gov.pl>

III. Meteorologia a radioaktywność powietrza

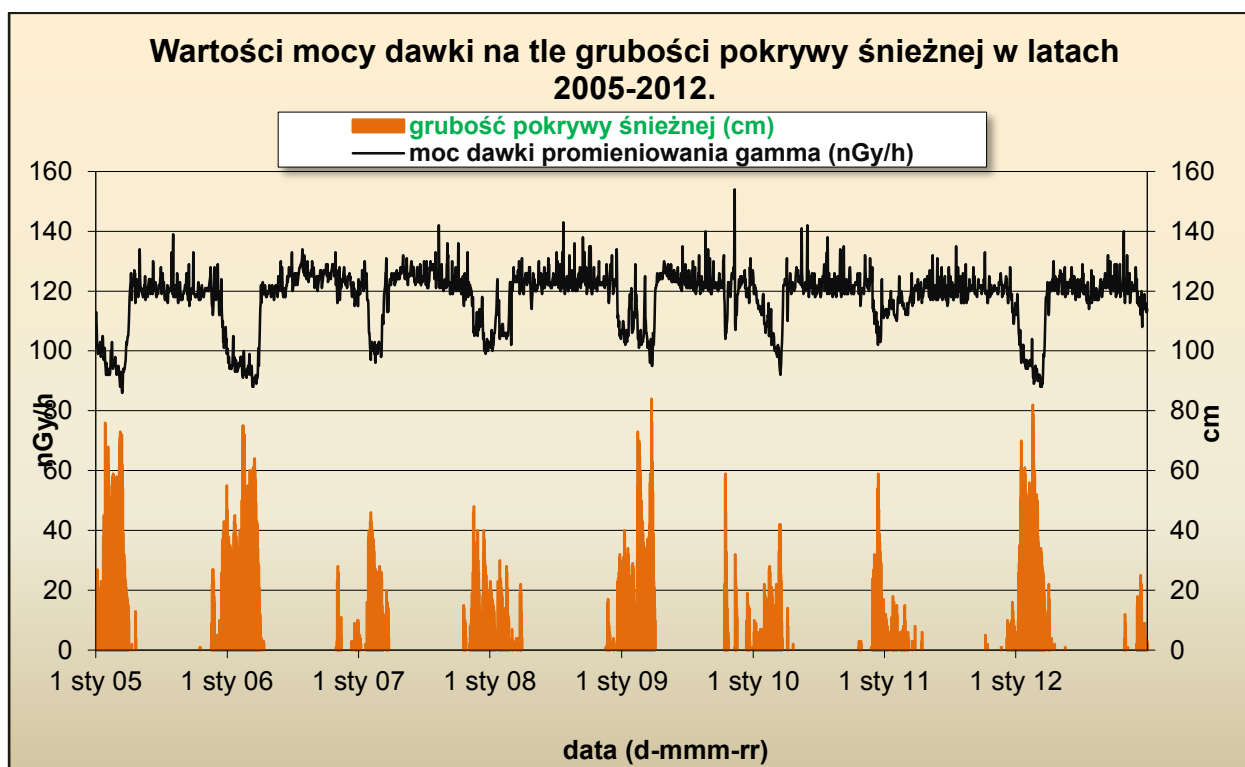
1. Związki parametrów meteorologicznych i wartości promieniowania gamma oraz radioaktywności aerozoli powietrza

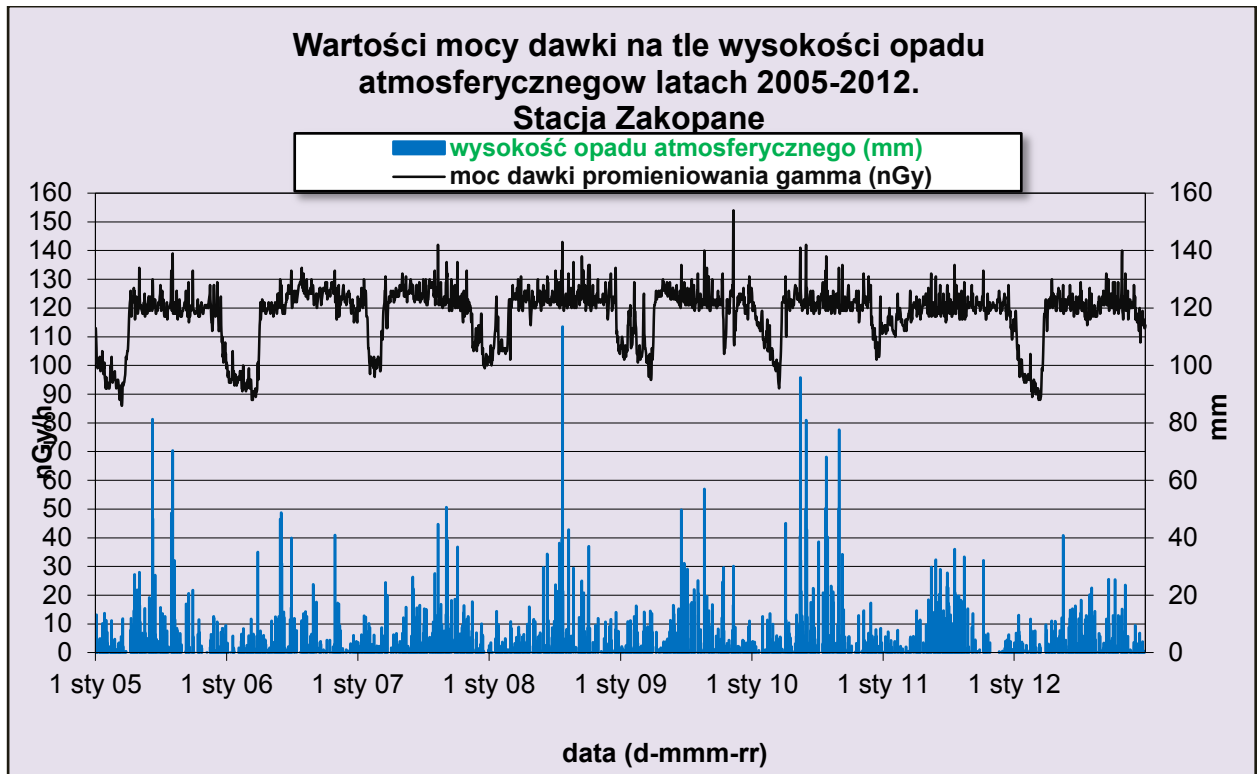
Opad deszczu skutkuje zwiększeniem mierzonej wartości mocy dawki promieniowania gamma. Przyczyną tego jest usuwanie przez deszcz cząstek radioaktywnych z powietrza na powierzchnię ziemi. Z kolei opad śniegu zmniejsza wartości mierzonej mocy dawki. Chodzi mianowicie o to, że warstwa śniegu ekranuje promieniowanie gamma pochodzące z powierzchni ziemi.

Natomiast opad deszczu zmniejsza mierzone wartości alfa naturalnego. Spowodowane jest to usunięciem z powietrza cząstek alfa naturalnych. Z kolei opad śniegu powoduje zwiększenie mierzonej wartości aktywności aerozoli alfa naturalnych. Najprawdopodobniej przyczyną jest zgęszczenie cząstek alfa w przyziemnej warstwie atmosfery.

Warto zauważyć, że zmienność ww. parametrów radiologicznych nie możemy tylko wiązać z opadem deszczu i śniegu. Dodatkowe elementy wpływające na wzrost lub osłabienie to: temperatura powietrza, pora roku a także nasłonecznienie.

2. Przykładowe wykresy nałożonych na siebie odpowiednich parametrów meteorologicznych (śniegu oraz deszczu) oraz parametrów radiologicznych zmierzonych w latach 2005-2012 na stacji Zakopane na tej i kolejnej stronie.





IV. Wnioski

- Zmierzone w roku 2012 wartości mocy dawki promieniowania gamma w powietrzu były na poziomie tła.
- Zmierzone w roku 2012 wartości aktywności opadu całkowitego dobowego i miesięcznego były również na poziomie tła.
- Zmierzone w roku 2012 wartości aktywności alfa i beta aerozoli w powietrzu były również na poziomie tła.
- Średni poziom mocy dawki promieniowania gamma jest zróżnicowany w zależności o położenia geologicznego. Największe wartości zanotowano w Zakopanym i Lesku z racji skalistego podłoża i otoczenia, które jest źródłem naturalnych izotopów w większym stężeniu niż sama tylko warstwa gleby
- Stwierdzono związki pomiędzy wartościami promieniowania alfa i gamma a parametrami meteorologicznymi. Opad deszczu zwiększa zmierzone wartości mocy dawki promieniowania gamma a zmniejsza radioaktywność aerozoli alfa w powietrzu. Opad śniegu zmniejsza wartości mocy dawki promieniowania oraz zwiększa radioaktywność aerozoli w powietrzu.
- Uzyskane wyniki pomiarów w roku 2012 świadczą o tym, że poziom promieniotwórczości w przyziemnej warstwie atmosfery nie odbiega od poziomu tła nie licząc jednorazowego wpływu awarii Elektrowni Jądrowej w Japonii na pomiar Cs-134 w kwietniu 2012 roku. Wpływ ten jest jednak teraz bardzo niski a możliwość jego obserwacji wynika z zastosowania bardzo czułych metod pomiarowych.