

ANALIZA 23. CYKLU AKTYWNOŚCI SŁOŃCA W OPARCIU O POMIARY Be-7 W PRZYZIEMNEJ WARSTWIE POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

Marian Fujak, Paweł Lipiński, Krzysztof Isajenko,
Barbara Piotrowska, Izabela Kwiatkowska

Streszczenie

Monitoring promieniotwórczości przyziemnej warstwy powietrza w Polsce jest prowadzony przez Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, które do tego celu wykorzystuje system sieci wysokoczułych stacji wczesnego ostrzegania ASS-500. Pobór i pomiar aerozoli powietrza wykonywany jest w sposób ciągły w Warszawie od lat siedemdziesiątych, a od 1992 r. w 12 stacjach w całym kraju. Stacje monitorują m.in. stężenie berylu-7 o czasie połowicznego rozpadu 53 dni, który powstaje w wyniku reakcji promieniowania kosmicznego (GCR oraz SEP) z azotem i tlenem w górnych warstwach stratosfery i troposfery. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów Be-7 w Warszawie, Katowicach oraz Gdyni w okresie 2002-2004, gdzie największa sezonowa depozycja Be-7 pojawia się cyklicznie w okresie wiosennym, co jest spowodowane m.in. procesami mieszania się mas powietrza w troposferze i stratosferze. Przedstawiono również wyniki pomiarów stężenia Be-7 z okresu 2000-2009, w którym została zaobserwowana anomalia aktywności Słońca w postaci wystąpienia tzw. podwójnego maksimum w cyklu 11-letnim.

Wprowadzenie

Przez aktywność słoneczną rozumiemy zmiany zachodzące na powierzchni i w atmosferze Słońca, które powodują wystąpienie fluktuacji promieniowania docierającego do Ziemi w postaci fal elektromagnetycznych oraz strumienia cząstek emitowanych przez Słońce (wiatr słoneczny) [1]. Jednym ze stosunkowo łatwo mierzalnych podstawowych parametrów są plamy słoneczne, będące powierzchniami o średnicy od ok. 4000 km do 30 000 km oraz o temperaturze ok. 1000-1500 K niższej od temperatury powierzchni Słońca (ok. 5778 K) i czasie życia od kilku dni do kilku miesięcy [2]. W 1843 r. Heinrich Schwabe odkrył tzw. 11-letni cykl aktywności słonecznej, natomiast w 1848 r. Rudolf Wolf wprowadził tzw. liczbę Wolfa, będącą miarą aktywności Słońca, która jest proporcjonalna do powierzchni zajmowanej przez plamy na tarczy wyrażonej wzorem:

$$W = k \cdot (10g + f)$$

gdzie,

g – liczba grup plam,

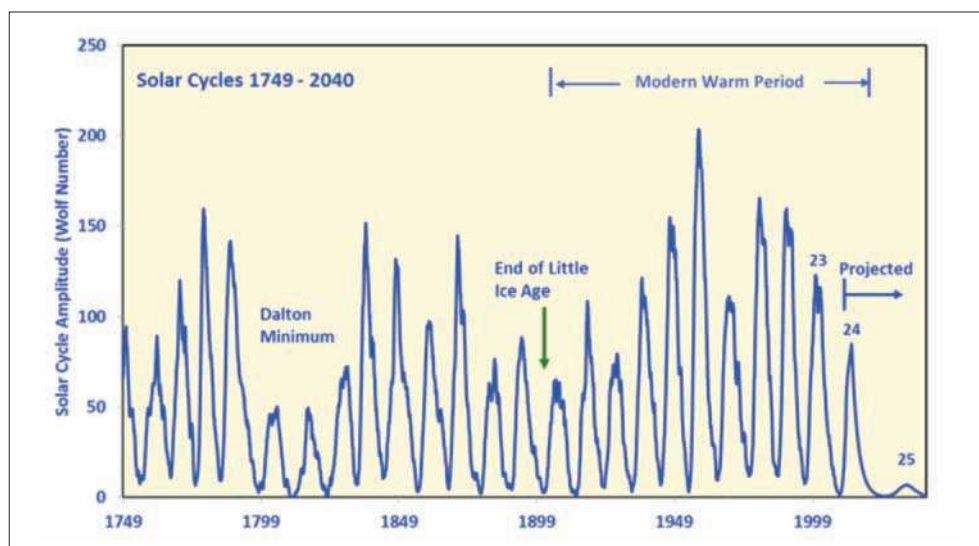
f – liczba wszystkich plam,

k – współczynnik zależny od cech indywidualnych obserwatora i od użytego sprzętu (obliczany przez porównanie serii obserwacji danego obserwatora ze standardowymi obserwacjami z Centralnego Biura Służby Słońca w Brukseli) [1].

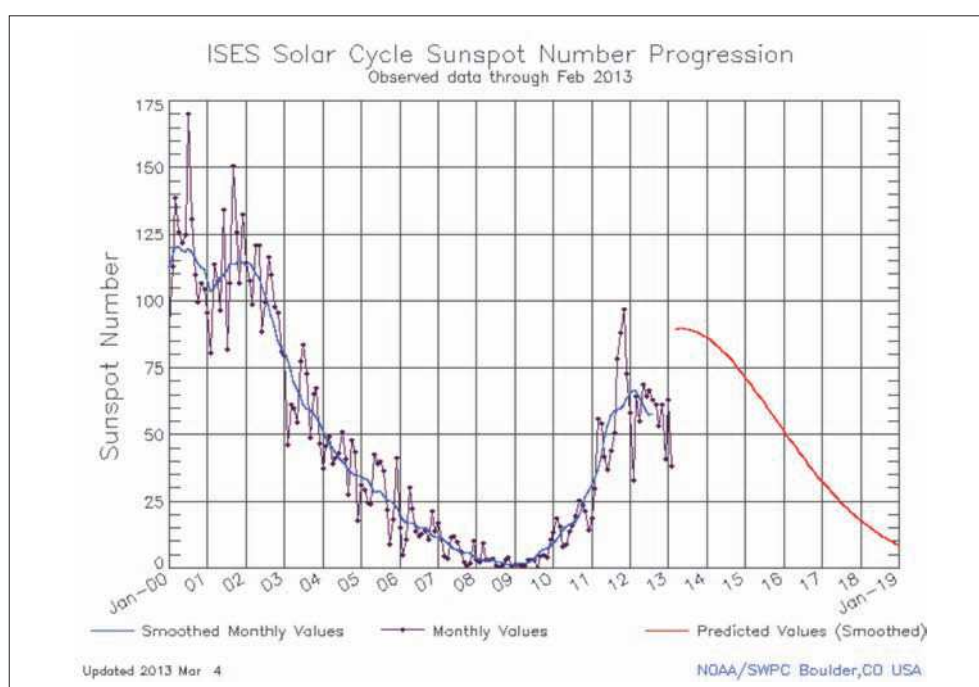
Największa liczba plam dla poszczególnych 11-letnich cykli zawiera się w granicach 48,7-201,3, natomiast czas trwania poszczególnych cykli wynosi od 9 do 14 lat.

Cykle 11-letnie obserwowane były od 1749 r. (rys. 1), początek cyklu 23. datowany jest na 23 maja 1996 r., a maksimum na lipiec 2000 r. (rys. 2 – według liczby plam). Natomiast biorąc pod uwagę strumień promieniowania radiowego fali 10,7 cm maksimum wystąpiło w 2002 r., co wskazuje na anomalię [2].

Jednym z efektów zmian aktywności Słońca jest także zmiana stężeń aktywności radionuklidów produkowanych przez promieniowanie kosmiczne [5, 6]. Beryl-7 jest izotopem, który jest produkowany w sposób naturalny jako wynik reakcji galaktycznego promieniowania kosmicznego (GCR) oraz wysokoenergetycznych cząstek emitowanych przez Słońce (SEP) z azotem i tlenem zawartym



Rys. 1. Okres 260 lat 11-letniego cyklu słonecznego – Archibald [3]

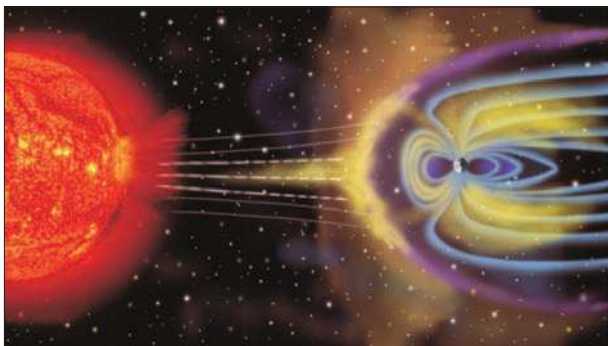


Rys. 2. Liczba zaobserwowanych plam na Słońcu w okresie od początku 2000 r. do lutego 2013 r. [4]

w stratosferze i górnych warstwach troposfery. Galaktyczne promieniowanie kosmiczne (GCR) jest prawie na stałym poziomie podczas, gdy słoneczne wysokoenergetyczne promieniowanie (SEP) jest związane z cykliczną aktywnością słoneczną [6, 7]. Stężenia Be-7 oraz innych radionuklidów powstałych w wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego są zależne od wysokości n.p.m. (największa produkcja na wysokości ok. 20 km), aktywności Słońca oraz intensywności pola magnetycznego Ziemi. Liczba plam słonecznych jest wskaźnikiem aktywności Słońca, które wpływa na pole magnetyczne otaczające Ziemię i redukuje intensywność promieniowania kosmicznego (GCR oraz SEP) oraz produkcję radionuklidów w stratosferze (anty-korelacja między GCR a aktywnością słoneczną) [5, 6].

Be-7 w powietrzu szybko łączy się z aerozolami, a jego stężenie w troposferze zależy od wysokości n.p.m. i średnio wynosi ok. 12,5 mBq/m³ [9, 10]. Wartość stężenia Be-7 dostarcza wielu informacji dotyczących procesu mieszania się mas powietrza między stratosferą a troposferą, a także transportu radionuklidów pochodzenia kosmicznego w kierunku powierzchni Ziemi [11].

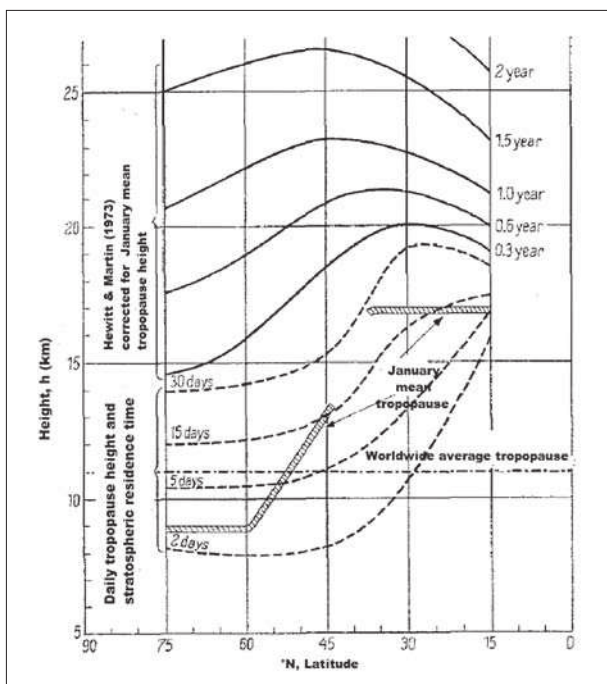
W przyziemnej warstwie powietrza stężenie Be-7 jest determinowane przez aktywność Słońca (zmieniająca się w cyklu 11-letnim), opady deszczu, wysokość geograficzną oraz inne warunki meteorologiczne [12]. Wielkość stężenia Be-7 w powietrzu oraz w opadzie mokrym może posłużyć do oszacowania depozycji jego strumienia. Podczas depozycji mokrej Be-7 jest transportowany z wyższych warstw troposfery. Ten proces zazwyczaj zachodzi



Fot. 1. Wpływ aktywności słonecznej na pole magnetyczne Ziemi [8]

w okresie wiosennym oraz letnim, kiedy transport powietrza ze stratosfery jest łatwiejszy w wyniku ogrzewania powierzchni Ziemi [5]. Prędkość depozycji aerozoli zależy od wielkości opadu mokrego oraz efektu sezonowego. Zależny od regionalnych warunków klimatycznych stosunek depozycji suchej do depozycji całkowitej dla Be-7, jest eksperymentalnie oszacowany na poziomie 10% [13]. Wytwarzanie Be-7 przez SEP oraz stężenie promieniotwórcze zmierzone w przyziemnej warstwie powietrza zależy od czasu transportu radionuklidu ze stratosfery. Jeśli czas transportu jest znacznie dłuższy niż czas połowicznego rozpadu (53.3 dni), to trudno jest wykryć wzmożone wytwarzanie Be-7. Transport Be-7 do warstw przyziemnych atmosfery jest zdominowany przez czas przebywania w stratosferze i górnej troposferze (rys. 3) [11].

Czas przebywania Be-7 w stratosferze został oszacowany przez Rehfelda i Heimanna (1995 r.) na 21 miesięcy [14]. Efekt mieszania się pionowych mas



Rys. 3. Czas przebywania zanieczyszczeń w powietrzu w funkcji wysokości i szerokości geograficznej [11]

powietrza w stratosferze i górnych warstwach troposfery jest przyczyną znacznego skrócenia czasu przebywania (funkcja wysokości i szerokości geograficznej, rys. 3). Średni czas przebywania Be-7 w troposferze obliczony przez Kocha (1996 r.) wynosi ok. 21 dni, który może zostać skrócony do 10-15 dni w zależności od warunków klimatycznych [15].

Aparatura pomiarowa

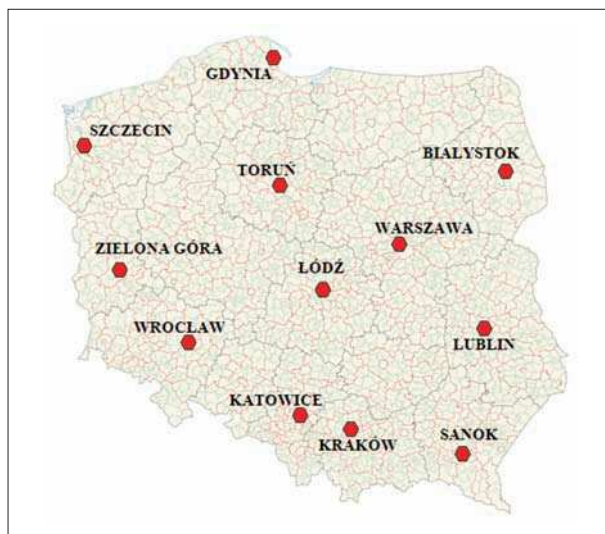
Stacja ASS-500 (Aerosol Sampling Station), przedstawiona na fot. 2, jest przeznaczona do monitoringu zanieczyszczeń powietrza w sytuacji normalnej i zagrożenia radiacyjnego.

Tygodniowy pobór aerozoli z objętości powietrza rzędu 10^5 m^3 pozwala na wykonywanie precyzyjnych pomiarów spektrometrycznych radionuklidów naturalnych i sztucznych (rejestracja stężeń na poziomie $1 \mu\text{Bq/m}^3$). Pobór próbek aerozoli może być prowadzony w zmiennych warunkach atmosferycznych, w dużym zakresie różnicy temperatur, przy zmieniającym się ciśnieniu czy wilgotności, a także przy mniejszym lub większym zapyleniu.



foto: z archiwum CLOR

Fot. 2. Nowy model stacji ASS-500 (stacja NASS-500 – New Aerosol Sampling Station)



Rys. 4. Rozmieszczenie stacji ASS-500 na terenie Polski

Stacja ASS-500 jest wolno stojącym urządzeniem do ciągłego poboru próbek aerozoli z powietrza. Rutynowo do poboru aerozoli stosowany jest filtr Petrianova typu FPP-15-1.5 o wysokiej wydajności zbierania. Wydajność Filtru Petrianova typu FPP 15-1.5 jest w zakresie 96%-99% dla aerozoli o średnicy 0,3 do 1,25 μm przy liniowym przepływie powietrza w zakresie 0,25 do 4 m/s i ciśnieniu wywieranym na filtr Δp 500 – 9300 Pa. W normalnej sytuacji radiologicznej prowadzony jest tygodniowy okres poboru próbki. Dodatkowo stacja ASS-500 jest wyposażona w sondę scyntylicyjną, która on-line rejestruje sytuację radiologiczną w miejscu lokalizacji stacji. Korzystając ze spektrometrów HPGe można wykrywać i oznaczać ilościowo radionuklidy naturalne i pochodzenia sztucznego. Zakres energii fotonów badanych radionuklidów zawiera się w granicach: od kilkunastu do ponad 2000 keV. Przygotowanie próbki do pomiaru podstawowego polega na doprowadzeniu jej do odpowiedniej geometrii pomiarowej, czyli sprasowaniu jej do postaci krążka o średnicy 51 mm i grubości od 4 do 8 mm (zależnie od ilości zebranego pyłu).

Pomiar Be-7 wykonywany jest laboratoryjnie poprzez pomiar linii gamma 478 keV za pomocą detektora HPGe o wydajności względnej 45% umieszczonego w domku ołowianym.

Stacje zlokalizowane są w 12 miejscach na terenie Polski (rys. 4).

Wyniki pomiarów

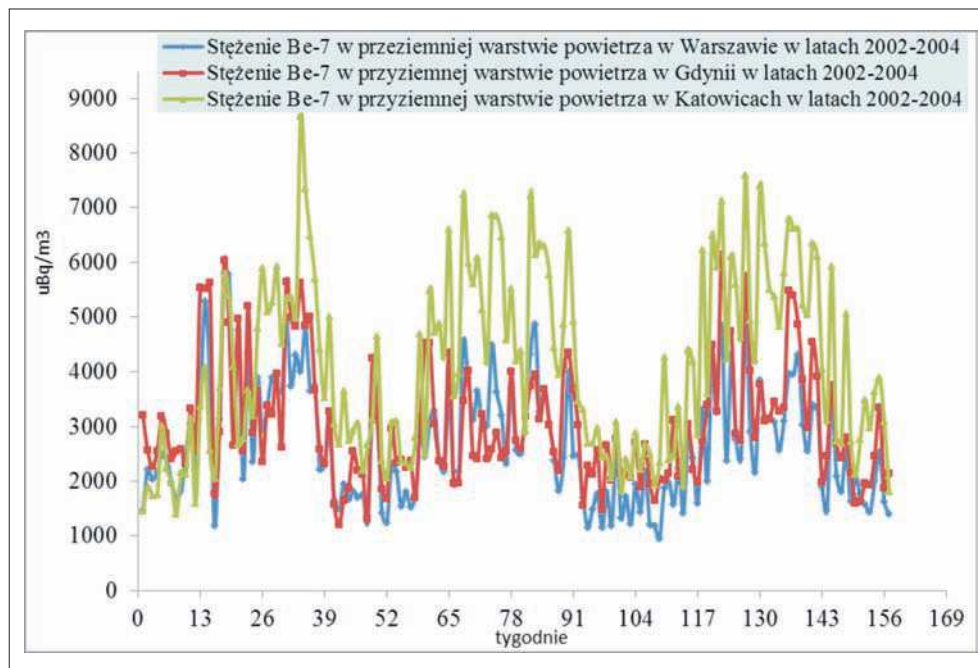
Poniżej przedstawiono wyniki tygodniowych pomiarów stężenia promieniotwórczego Be-7 w przyziemnej warstwie powietrza z trzech wybranych stacji ASS-500 w Polsce (Warszawa, Katowice i Gdynia) w okresach 2002-2004 oraz 2000-2009.

Rejony zostały wybrane ze względu na geograficznie różne położenie stacji oraz ilość aerozoli obecnych w powietrzu.

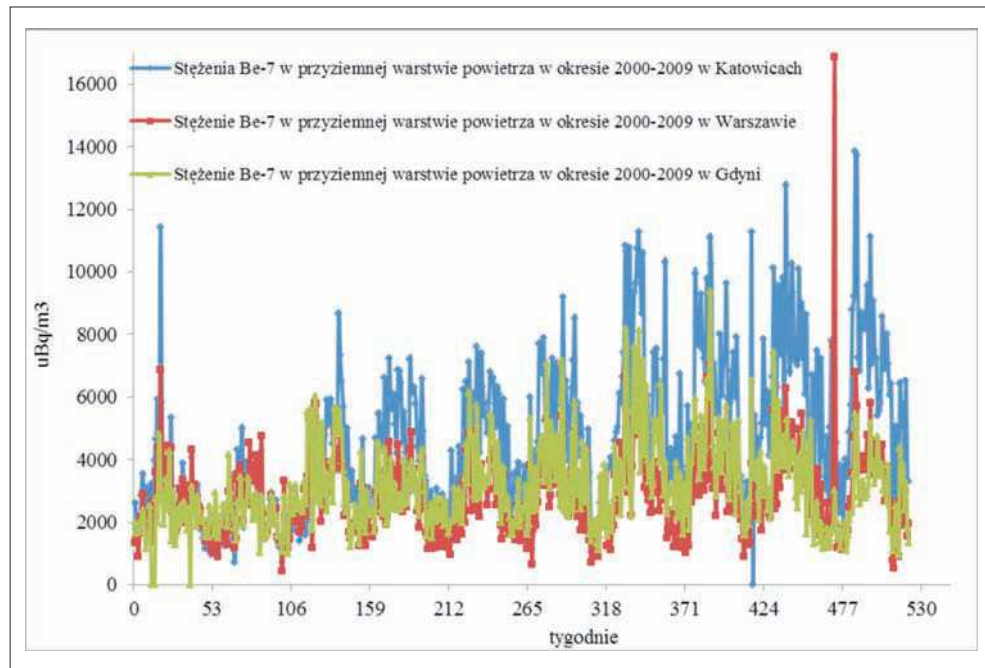
Tygodniowe stężenie Be-7 w powietrzu w latach 2002-2004 przedstawiono na rys. 5. Wartość stężenia promieniotwórczego radionuklidu zmienia się cyklicznie w zależności od pory roku. Największa sezonowa depozycja Be-7 pojawia się w okresie wiosennym. Spowodowane jest to m.in. procesami mieszania mas powietrza w troposferze i stratosferze oraz opadami deszczu. Ten proces zazwyczaj pojawia się w okresie wiosennym i letnim, kiedy transport powietrza ze stratosfery jest łatwiejszy przez ogrzewanie powierzchni Ziemi. Wartości stężenia Be-7 w Katowicach są wyraźnie większe niż w pozostałych dwóch stacjach, co może być spowodowane czynnikami środowiskowymi (przy większym zapyleniu powietrza beryl może się łatwiej przyłączyć do aerozoli, które stają się matrycą).

Na rys. 6 zestawiono wyniki tygodniowych pomiarów stężenia promieniotwórczego Be-7 w aerozolu przyziemnej warstwy powietrza w okresie 2000-2009 dla trzech wybranych stacji. Na rys. 2 przedstawiono liczbę zaobserwowanych plam słonecznych w latach 2000-2012, w okresie 2000-2001 jest widoczne podwójne maksimum cyklu 23 (lipiec 2000 r. oraz 2001 r.); następnie liczba plam na Słońcu zmniejsza się, osiągając swoje minimum w 2009 r.

Porównując liczbę plam na Słońcu (rys. 2) oraz zmierzone stężenia promieniotwórcze Be-7 w przyziemnej warstwie powietrza (rys. 6) można zaobserwować wyraźną anty-korelację, gdyż aktywność słoneczna wpływa na pole magnetyczne otaczające Ziemię i redukuje intensywność promieniowania kosmicznego (GCR i SEP) oraz produkcję radionuklidów w atmosferze.



Rys. 5. Stężenie promieniotwórcze Be-7 w przyziemnej warstwie powietrza w Warszawie, Gdyni oraz Katowicach w latach 2002-2004



Rys. 6. Stężenie promieniotwórcze Be-7 w przyziemnej warstwie powietrza w Warszawie, Gdyni oraz Katowicach w latach 2000-2009

Największą wartość stężenia Be-7 w czasie trwania maksimum 23-cyklu słonecznego zmierzono w Polsce w okresie od 1 do 8 maja 2000 r., w tym czasie nie zanotowano żadnych opadów deszczu, które mogłyby świadczyć o mokrej depozycji. Wykluczając wpływ warunków środowiskowych, podwyższoną wartość zmierzonego Be-7 można interpretować zmianami zachodzącymi na Słońcu.

Wnioski

Zmiany stężenia promieniotwórczego Be-7 w przyziemnej warstwie aerozoli powietrza spowodowane są m.in. suchą i mokrą depozycją. Depozycja ta ulega zmianie cyklicznie w zależności od pory roku co jest związane z pionowymi ruchami mas powietrza w stratosferze i troposferze oraz ogrzewaniem powierzchni Ziemi. Na zmianę stężenia promieniotwórczego Be-7 ma także wpływ ilość zawartych w powietrzu aerozoli, o czym świadczą pomiary wykonane w Katowicach oraz w Gdyni. Innym istotnym parametrem, mającym także duży wpływ na stężenia Be-7 w powietrzu są zmiany aktywności Słońca.

mgr inż. Marian Fajak, mgr inż. Paweł Lipiński,
mgr inż. Krzysztof Isajenko, mgr Barbara Piotrowska,
mgr Izabela Kwiatkowska,
Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej,
Warszawa

Literatura:

- [1] Strona internetowa: http://pl.wikipedia.org/wiki/Aktywno%C5%9B%C4%87_s%C5%82oneczna.
- [2] Cader-Sroka B., „Cykle aktywności Słońca”, prezentacja, Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego. <http://www.copernicus.acruostar.pl/dokumenty/prezentacje/Cykle%20aktywnosci%20Slonca.pdf>.
- [3] Strona internetowa <http://iceagenow.info/2012/03/australian-scientist-warns-entered-sharp-cooling-period-due-solar-activity/>.
- [4] Strona internetowa: National Weather Service Space Weather Prediction Center <http://www.swpc.noaa.gov/>.
- [5] Chao J. H., Chiu Y. J., et al., 2012, Deposition of beryllium-7 in Hsinchu, Taiwan, Applied Radiation and Isotopes 70, 415-422.
- [6] Masarik J., Beer J., Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere, J. Geophys. Res. 104, 12099-12111, 1999.
- [7] Phillipps G.W., et al., Correlation of upper-atmospheric Be-7 with solar energetic particle events, Geophys. Res. Lett., 28, 939-942, 2001.
- [8] Strona internetowa <http://www.nasa.gov/>.
- [9] Bondietti E.A., Hoffmann F.O., Larsen, I.L., 1984. Air-to-vegetation transfer rates of natural submicron aerosols. J. Environ. Radioact. 1, 5-27.
- [10] UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation, vol. I. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
- [11] Elmar R. Reiter, W. Carnuth et al. „Measurements of Stratospheric Residence Times”, 1975, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 24, 41-51.
- [12] Azahra M., Camacho-Garcia A., Gonzalez-Gomez C., Lopez-Penalver J.J., Bardouni T.El., 2003. Seasonal 7Be concentrations in near-surface air of Granada (Spain) in the period 1993-2001. Appl. Radiat. Isot. 59, 159-164.
- [13] Ioannidou A., Papastefanou C., 2006. Precipitation scavenging of 7Be and 137Cs radionuclides in air. J. Environ. Radioact. 85, 121-136.
- [14] Rehfeld S., Heimann M., 1995. Three dimensional atmospheric transport simulation of the radioactive tracers, 210Pb, 7Be, 10Be and 90Sr. J. Geophys. Res. 100, 26141-26161.
- [15] Koch D.M., Mann M.E., 1996, Spatial and Temporal variability of Be-7 surface concentrations Tellus 48B, 387-396.