

ЦРНОГОРСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЈЕТНОСТИ
ГЛАСНИК ОДЈЕЉЕЊА ПРИРОДНИХ НАУКА, 18, 2009.

ЧЕРНОГОРСКАЈА АКАДЕМИЈА НАУК И ИСКУССТВ
ГЛАСНИК ОДДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК, 18, 2009

THE MONTENEGRIN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS
GLASNIK OF THE SECTION OF NATURAL SCIENCES, 18, 2009.

UDK 539-1

N. Antović, P. Vukotić*, N. Svrkota***

GAMA-FON I OSJETLJIVOST SPEKTROMETRA PRIPJAT-2M U RAZLIČITIM KOINCIDENTNIM REŽIMIMA RADA

Izvod

U radu su prikazane karakteristike šest-kristalnog gama-spektrometra PRIPJAT-2 M. Spektri fona snimljeni u integralnom, nekoincidentnom i u različitim koincidentnim režimima, ukazuju na prednosti rada spektrometra u režimu koincidencija. Brzina brojanja fona pojedinačnim detektorima i cijelim spektrometrom najveća je u integralnom i nekoincidentnom režimu rada, a najmanja u režimu šestostrukih koincidencija. Proračun minimalne detektibilne aktivnosti u nekoincidentnom ($A(1) \approx 0.38$ Bq) i u režimu dvostrukih koincidencija ($A(2) \approx 0.038$ Bq), zasnovan na eksperimentalnim podacima, potvrdio je desetostruko veću osjetljivost spektrometra PRIPJAT-2 M kada radi u režimu dvostrukih koincidencija.

GAMMA-BACKGROUND AND SENSITIVITY OF THE SPECTROMETER PRIPYAT-2 M IN DIFFERENT COINCIDENCE MODES OF COUNTING

Abstract

Characteristics of the six-crystal gamma-spectrometer PRIPJAT-2 M are presented in the paper. Background spectra in integral, non-coinciden-

* Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica

** Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica

ce and different coincidence modes show advantages of the spectrometer coincidence mode of counting. Background count rate of the detectors and whole spectrometer is the highest in the integral and non-coincidence mode, and the lowest in the six-fold coincidences mode of counting. A calculation of the minimum detectable activity in the non-coincidence ($A(1) \approx 0.38$ Bq) and two-fold coincidences mode ($A(2) \approx 0.038$ Bq), based on experimental data, confirmed ten times better sensitivity of the PRIPYAT-2 M spectrometer when counting double coincidences.

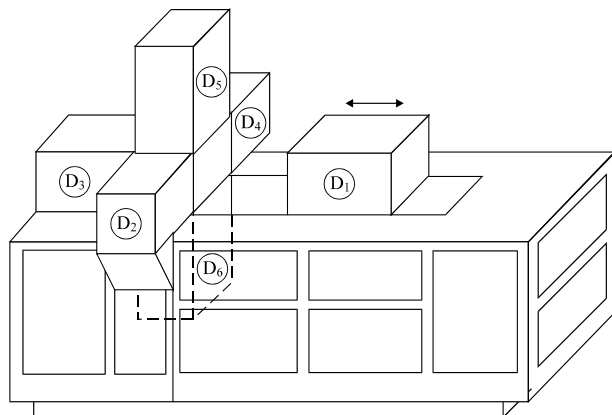
UVOD

Rješavanje velikog broja problema u savremenoj nuklearnoj fizici zavisi od eksperimentalnih mogućnosti. Ovo je uslovalo razvitak eksperimentalne opreme, metodologija i sistema registracije, kao i analize na ovaj način dobijenih rezultata. Detekcija i istraživanje rijetkih raspada i interakcija, ispitivanje kaskadnih prelaza, zračenja slabih intenziteta i tome slično, zahtijevaju višedetektorske sisteme koji imaju 4π geometriju. Zbog 4π geometrije, velike efikasnosti registracije γ -zračenja, znatno veće osjetljivosti, mogućnosti koincidentnih mjerenja akata γ -zračenja različitih višestrukosti i slično, višedetektorski spektrometri imaju značajne prednosti u odnosu na spektrometare sa jednim detektorom.

SPEKTROMETAR PRIPJAT-2M

Spoljašnje dimenzije spektrometra PRIPJAT-2 M (konstruisanog u Laboratoriji za nuklearnu spektroskopiju Instituta za fiziku Akademije nauka Bjelorusije u Minsku, a koji se nalazi u Laboratoriji za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Podgorici) su: dužina 250 cm, širina 145 cm i visina 186 cm, dok je ukupna masa spektrometra 4 200 kg [1]. U sastav spektrometra (Sl. 1) ulaze šest NaI (TI) detektora, njihova čelična i olovna zaštita, elektromotor za otvaranje i zatvaranje detekcione komore, elektronika tipa CAMAC i personalni kompjuter.

Spektrometar ima šest identičnih sekcija sa detektorima, od kojih su četiri u horizontalnom, a dvije u vertikalnom položaju. Jedna od horizontalno postavljenih sekcija je pokretna i otvara i zatvara detekcionu komoru spektrometra. Svaka od sekcija predstavlja čelični (zbog zaštite od spoljašnjeg zračenja) paralelopiped dimenzija 18 x 18 x 10 cm (sa cilindričnim otvorom dijametra 16.5 cm), unutar koga je smješten standardni

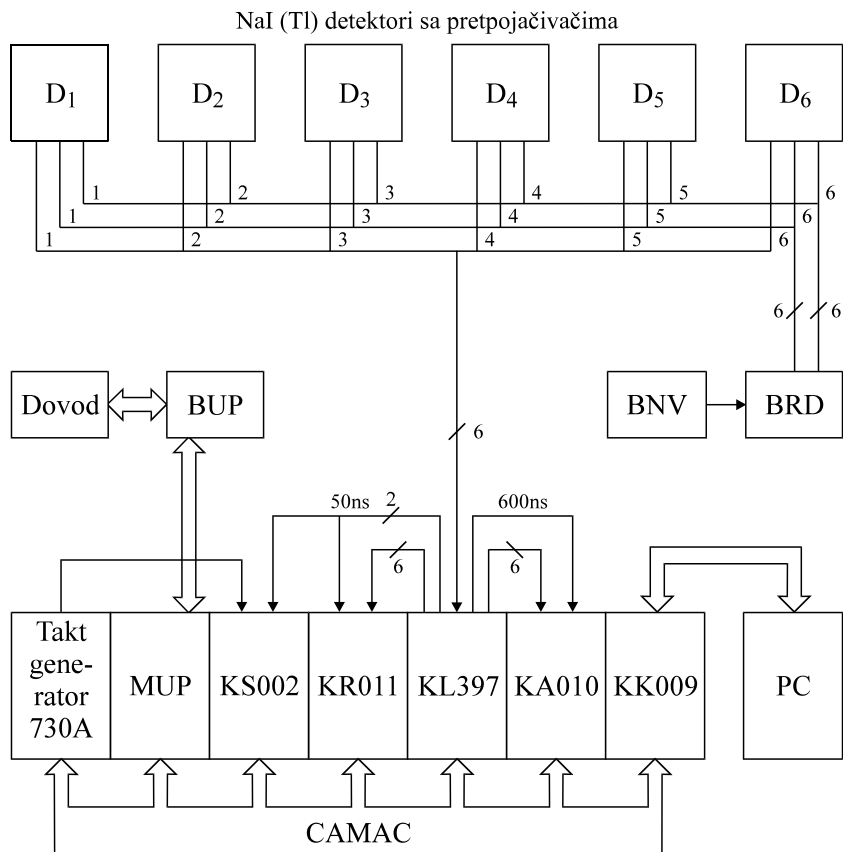


Sl. 1. Spoljašnji izgled spektrometra PRIPJAT-2M.
D1 – D6 su sekcije sa NaI(Tl) detektorima

scintilacioni blok BDEG 2-39 (proizvodnje bivšeg SSSR), koji se sastoji od kristala NaI (Tl) (dijametra 15 cm i visine 10 cm) i od fotomultiplikatora FEU-173. I kristal i fotomultiplikator su smješteni u aluminijski kontejner, zbog higroskopsnosti. Čela detektora nalaze se na stranicama kocke, ivice 17.5 cm, formirajući tako relativno veliku detekcionu komoru unutar spektrometra. Između scintilacionih blokova postavljena su po dva čelična paralelopipeda, kao zaštita od rasijanog γ -zračenja, koje predstavlja osnovni izvor stvarnih fonskih koincidencija. Spektrometar ima i olovnu zaštitu debljine do 15 cm.

Blok šema i princip rada spektrometra

Strukturna šema rada spektrometra PRIPJAT - 2M data je na Sl. 2.



Sl. 2. Blok šema spektrometra PRIPJAT-2M.

BNV je izvor visokog napona, a BRD djelitelj napona za pretpojačivače i detektore. Upravljanje elektromotorom, koji pokreće pokretni blok koji otvara i zatvara detekcionu komoru, ostvaruje se automatski preko bloka MUP, ili ručno preko pulta BUP.

Sistem registracije signala sa detektora realizovan je u standardu CAMAC i sadrži sljedeće module: 6-kanalni pojačivač KL 397, 16-kanalni hodoskop KR 011, 8-kanalni analogno-digitalni konvertor (ADC) KA 008, dvojni brojač KS 002, takt generator (Clock Generator 730 A) i kontroler KK 009 sistema CAMAC modula, povezan sa upravljačkim kompjuterom.

Princip rada sistema registracije γ -zračenja je sljedeći. Signali sa fotomultiplikatora stižu na ulaze odgovarajućih pojačivača. Signal sa svakog od detektora se grana i ide na vremensku (dužina signala 50 ns) i na am-

plitudnu (dužina signala 600 ns) analizu, čime se ostvaruje šest nezavisnih amplitudno-vremenskih analiza signala u spektrometru.

Vremenska analiza događaja vrši se hodoskopom, metodom registracije koincidentnih signala. Odnosno, u hodoskopu se zapisuju brojevi detektora koji su istovremeno radili, tj. čiji su impulsi koincidirali. Ako se koincidencija (dvostruka, trostruka i dalje – do šest) desila, u memoriju analizatora impulsa ulaze impulsi sa amplitudama koje su jednake amplitudi signala sa izlaza detektora koji su registrovali koincidenciju. Amplituda je proporcionalna energiji zračenja, pa se iz amplitudne raspodjele impulsa, pomoću ADC i energetske kalibracije, dobija energetski spektar detektovanog zračenja.

Prednosti spektrometra PRIPJAT - 2M u odnosu na jednokristalne spektrometre

U odnosu na spektrometre sa jednim NaI(Tl) detektorom, spektrometar PRIPJAT-2M ima značajne prednosti, kao što su: mogućnost mjerenja uzoraka velike zapremine (do 5 dm³) i proizvoljnog oblika, čime se izbjegava specijalna priprema uzoraka radi dobijanja standardne geometrije, 4 π -geometrija mjerenja i velika efikasnost registracije γ -zračenja, znatno veća osjetljivost, tj. niži detekcioni minimum, te mogućnost rada u režimu koincidencija do višestrukosti šest.

Navedene prednosti obezbijedene su sveukupnošću karakteristika spektrometra: brojem i tipom detektora u sistemu, oblikom i veličinom detekcione komore u spektrometru, prostornim uglom (geometrijskom efikasnošću detekcije) od 0.7 x 4 π sr, amplitudnom analizom spektara pomoću 6 ADC sa po 256 kanala, energetskom rezolucijom od 10.5 % za fotoliniju ¹³⁷Cs na 662 keV, vremenskom rezolucijom koincidencija od 40 ns, maksimalnom brzinom brojanja spektrometra od 10⁵ imp/s.

Osim navedenih prednosti, važna osobina instrumenta jesu dobri fonksi uslovi - zbog kvalitetne pasivne zaštite detektora i mogućnosti rada u različitim koincidentnim režimima, kao i jednostavnost upravljanja sistemom i automatska obrada rezultata mjerenja.

Režimi rada spektrometra

Ranije korišćeni softver PRIP omogućavao je spektrometru da radi u dva režima: integralnom [1-6] i u režimu koincidencija [1-1]-[2-6].

U integralnom režimu [1-6] svaki od detektora registruje ukupno γ -zračenje koje dopijeva do njega (koincidentno i nekoincidentno). Softver omogućava pregled pojedinačnih spektara sa svih šest detektora, te sumarnog spektra i, nakon obrade, dobijanje informacije o energijama, izotopima i aktivnostima, uz korišćenje odgovarajućih biblioteka. Naime, pri svakoj novoj kalibraciji spektrometra formira se odgovarajuća biblioteka – u prvom redu radna, a zatim i biblioteka γ -linija i izotopa, koja će vršiti obradu spektara u toj seriji mjerenja, odnosno uvijek kada se u procesu obrade naznači data kalibracija. Ovaj režim rada je posebno pogodan za detekciju i proračun aktivnosti onih izvora γ -zračenja kod kojih se prelaz iz pobuđenog u osnovno stanje vrši uz emisiju jednog γ -zraka.

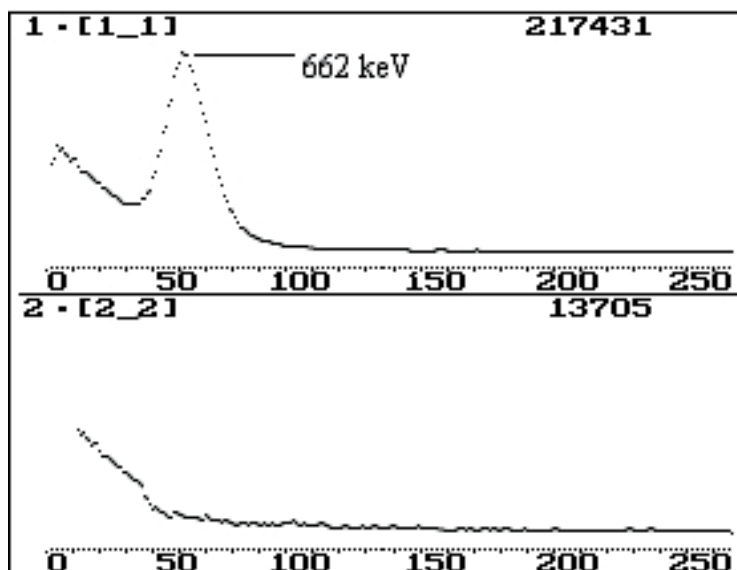
U drugom - koincidentnom režimu [1-1]-[2-6], dobijaju se nekoincidentni spektri [1-1] sa svih šest detektora pojedinačno, te spektri koincidencija [2-6] (višestrukosti od 2 do 6) sa svakog od detektora, sumarni spektar [1-1], kao i sumarni spektar [2-6]. Za isti izvor zračenja, mjeren pod istim uslovima, broj odbroja u sumarnom spektru u režimu [1-6] trebalo bi da bude jednak sumi broja odbroja u režimima [1-1] i [2-6], u granicama statističke greške. Nakon softverske analize, dobijaju se podaci o energijama i izotopima, aktivnosti (ili specifičnoj aktivnosti) izvora zračenja i sl.

Adekvatnim podešavanjem elektronskih kola, te modifikacijom softvera PRIP, osim prethodno navedenih režima, nedavno je omogućen i rad spektrometra istovremeno u nekoincidentnom režimu i u režimima odvojenih dvostrukih, trostrukih, četverostrukih i šestostrukih koincidencija (tj. omogućeni su režimi [1-1]-[2-2], [1-1]-[3-3], [1-1]-[4-4], [1-1]-[5-5], [1-1]-[6-6]). Ovo znači da, ako je, na primjer, izabran režim [1-1]-[4-4], spektrometar snima sve nekoincidentne impulse (u spektru [1-1]), ali i sve dvostruke, trostruke i četverostruke koincidencije, dok softver omogućava da se vide i analiziraju spektri svakog od pojedinačnih detektora u svim navedenim režimima rada, kao i sumarni spektri za režime [1-1], [2-2], [3-3] i [4-4].

U svim režimima rada, softver omogućava oduzimanje odgovarajućeg spektra fona, snimljenog u istim uslovima u kojima je izvršeno snimanje uzorka. Softver, dalje, između ostalog, može da od ukupnog broja registrovanih koincidencija oduzima slučajne koincidencije višestrukosti od 2 do 6 i sl. Treba napomenuti da se doprinos slučajnih koincidencija može i proračunati na odgovarajući način i nakon toga, bez primjene softvera,

jednostavnim oduzimanjem korigovati broj odbroja u određenom koincidentnom spektru.

Kao ilustracija koincidentnog režima rada spektrometra PRIPJAT-2M, na Sl. 3 predstavljeni su sumarni spektri dobijeni mjerenjem kalibracionog izvora ^{137}Cs u režimu [1-1]-[2-2]. Brojevi u desnim gornjim uglovima označavaju ukupan broj impulsa u spektru. U nekoincidentnom spektru uočava se izražen fotopik ^{137}Cs na energiji 662 keV, dok ga u koincidentnom spektru nema (jer je ^{137}Cs monoenergetski izvor).



Sl. 3 Kalibracija spektrometra

Kalibraciona procedura kod spektrometara tipa PRIPJAT predviđa korišćenje dva monoenergetska izvora γ -zračenja pogodnih energija. Za kalibraciju spektrometra trenutno se koriste kalibracioni izvori ^{137}Cs i ^{40}K , proizvedeni u VNIIM im. D. I. Mendeleeva – Sankt Peterburg, koji su pakovani u cilindrične plastične posude spoljašnjeg dijametra 10.7 cm (debljina zida je 1.0 mm) i visine 8 cm. Izvor ^{137}Cs (OMASN No 72/94-2, smola mase 0.486 kg) imao je 01.01.1994. godine aktivnost 870 Bq, određenu sa greškom od 3 % za nivo povjerenja 95 %, a izvor ^{40}K (OMASN No 103/92, kalijum-hlorid mase 0.550 kg) imao je 01.08.1992. godine aktivnost 9000 Bq, određenu sa greškom od 5 %, na nivou povjerenja 95 %.

Na osnovu snimljenih spektara ovih izvora (u režimu [1-6]), upotrebom softvera PRIP, dobijaju se zavisnosti: energija (keV) – broj kanala; širina pika na poluvisini (izražena brojem kanala) – energija (keV); fotoefikasnost – energija (keV); totalna efikasnost – energija (keV).

Kalibracija u koincidentnom režimu vrši se istim kalibracionim izvorima kao i u režimu [1-6], pa su i kalibracioni dijagrami isti. Ono što predstavlja osobenost kalibracije u ovom slučaju jeste radna biblioteka za koincidentni režim, koja iz uobičajene kalibracije uzima potrebne podatke, a onda vrši odgovarajući proračun za efikasnosti registracije pojedinih linija u kaskadi (uz proračun greške), koristeći pri tome odgovarajuće biblioteke kaskada (k 11. lbk, k 22. lbk i k 33. lbk). Dakle, ukoliko naznačena biblioteka sadrži izotope koji imaju kaskadne γ -prelaze, softver automatski konsultuje biblioteku kaskada, preuzima podatke o linijama i relativnim intenzitetima i vrši proračune efikasnosti. Ovim je izbjegnuta potreba za posebnim kalibrisanjem spektrometra u režimu koincidencija i potreba za korišćenjem kalibracionih izvora koji emituju γ -zrake u kaskadi.

GAMA-FON KOD SPEKTROMETRA PRIPJAT – 2 M

Izvori fona γ -zračenja kod scintilacionih detektora uopšte, pa samim tim i kod spektrometara PRIPJAT-2 M su: kosmičko zračenje, zračenje radionuklida iz materijala u okolini i iz zaštite spektrometra, kao i zračenje radionuklida koje sadrži sam NaI(Tl). Drugi faktor predstavlja zračenje uglavnom uslovljeno radioizotopom ^{40}K i potomcima raspada uranijuma i torijuma, a treći je uslovljen prisustvom ^{40}K u staklu fotomultiplikatora.

Da bi se umanjio stepen uticaja navedenih izvora fona kod spektrometra PRIPJAT-2 M upotrijebljena je pasivna (olovna i čelična) zaštita detektora, a njegovi djelovi su izgrađeni od niskofonskih materijala. Sa druge strane, u ovako koncipiranom detekcionom sistemu, osnovno i veoma efikasno sredstvo smanjenja brzine brojanja fona jeste metod koincidencija [2].

Na Sl. 4 predstavljeni su sumarni spektri fona snimljeni na spektrometeru PRIPJAT-2 M, čija analiza jasno pokazuje prednost rada u režimu koincidencija u odnosu na rad u običnom – integralnom režimu. Brzina brojanja fona b u energetskom dijapazonu od 200 keV do 2000 keV iznosi je:

1) $b = 30.13$ imp/s u režimu [1-6] (ukupan broj impulsa u spektru: 30 132, za 1000 s mjerenja);

2) $b = 23.03$ imp/s u režimu [1-1] (ukupan broj impulsa u spektru fona: 23 032, za 1000 s mjerenja).

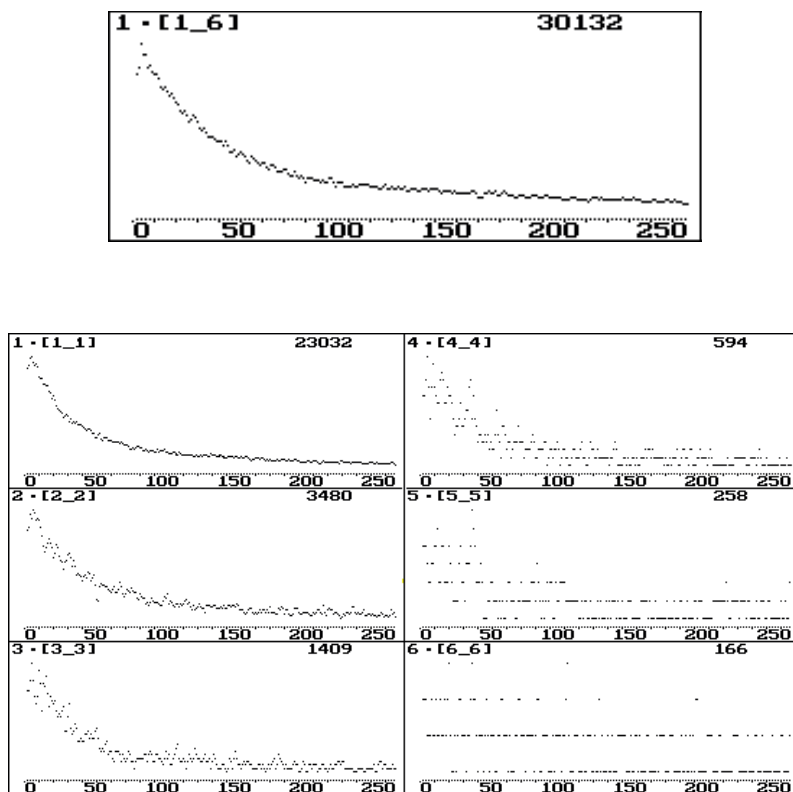
3) $b = 3.48$ imp/s u režimu [2-2] (ukupan broj impulsa u spektru fona: 3 480, za 1000 s mjerenja).

4) $b = 1.41$ imp/s u režimu [3-3] (ukupan broj impulsa u spektru fona: 1 409, za 1000 s mjerenja).

5) $b = 0.59$ imp/s u režimu [4-4] (ukupan broj impulsa u spektru fona: 594, za 1000 s mjerenja).

6) $b = 0.26$ imp/s u režimu [5-5] (ukupan broj impulsa u spektru fona: 258, za 1000 s mjerenja).

7) $b = 0.17$ imp/s u režimu [6-6] (ukupan broj impulsa u spektru fona: 166, za 1000 s mjerenja).



Sl. 4

U lijevim gornjim uglovima na Sl. 4 navedeni su režimi rada spektrometra, a u desnim gornjim uglovima dati su ukupni odbroji u sumarnom spektru.

Prema tome, kod spektrometra PRIPJAT-2 M, u režimu dvostrukih koincidencija fon u spektrima γ -zračenja je više od 8 puta manji nego u integralom ([1-6]) režimu detekcije zračenja, dok je u režimu šestostrukih koincidencija fon manji više od 180 puta.

MINIMALNA DETEKTIBILNA AKTIVNOST

Minimalna aktivnost $A(k)$ koju je moguće registrovati višedetektorskim spektrometrom može biti predstavljena izrazom [3, 4]:

$$A(k) = \frac{\alpha^2 (1 + \sqrt{1 + 8k\tau^{k-1} C_N^k (2R)^k \prod_{j=1}^k b_j t / \alpha^2})}{2t C_N^k \prod_{j=1}^k \mathcal{E}_j} \quad (1)$$

gdje je - C_N^k broj kombinacija od N detektora u spektrometru po broju detektora koji istovremeno rade, tj. čiji su impulsi koincidentni, α je koeficijent određen zadatom pouzdanošću dobijanja rezultata, t vrijeme mjerenja, b zajednička $R = \frac{\Delta}{m_0}$ brzina brojanja fona u čitavom energetsom dijapazonu M , a je m_0 rezolucija (m_0 označava broja kanala u kojem se nalazi centroida fotopika).

Proračun minimalne aktivnosti izvora zračenja koji emituje γ -zrake u kaskadama, a koju je moguće registrovati spektrometrom PRIPJAT-2M, potvrđuje prednost koincidentnog metoda. Proračun po formuli (1) izvršen je za $k = 1, 2, 3$. Posmatrani su radionuklidi: ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1173 keV, 1333 keV) i ^{48}Sc (984 keV, 1038 keV, 1312 keV). Pri proračunu je uzeta srednja vrijednost efikasnosti registracije navedenih γ -prelaza $\varepsilon = 0.042$ (kao aritmetička sredina pojedinačnih vrijednosti efikasnosti), vrijeme rezolucije 40 ns, i energetska rezolucija 0.1. Vrijeme mjerenje bilo je 1000 s, a pouzdanost mjerenja je određivana sa koeficijentom $\alpha = 1$. Kao rezultat proračuna prema formuli (1), dobijene su sljedeće vrijednosti minimalnih aktivnosti $A(k)$: $A(1) \approx 0.38$ Bq, $A(2) \approx 0.038$ Bq, $A(3) \approx 0.70$ Bq, što znači da je osjetljivost instrumenta u režimu dvostrukih

koincidencija u razmatranom slučaju oko deset puta bolja nego u nekoincidentnom režimu i više od osamnaest puta bolja nego u režimu trostrukih koincidencija.

Treba napomenuti da su eksperimentalna istraživanja na višedetektorskim spektrometrima sa kristalima NaI (Tl) jednakih dimenzija i efikasnosti detekcije, kao i teorijski proračuni koji prate ova istraživanja, pokazali da, sa stanovišta postizanja maksimalne efikasnosti, nije uvijek optimalno rješenje registracija kaskade fotona u režimu koincidencija čija je višestrukost jednaka broju fotona u kaskadi (osim kada se radi o monoenergetskim izvorima i nekoincidentnoj registraciji zračenja), zbog čega je i za kaskade koje čine više fotona u nekim slučajevima najpogodnije koristiti režim dvostrukih koincidencija [5].

ZAKLJUČAK

Znatno niži fon spektrometra PRIPJAT-2 M u režimu koincidencija i njegova znatno bolja osjetljivost u tom režimu rada, te velika efikasnost registracije γ -zračenja, čine ovaj spektrometar veoma pogodnim za mjerenje niskih aktivnosti radioizotopa čija se jezgra deeksitiraju uz emisiju kaskada fotona. Kao posebno pogodan može se izdvojiti režim dvostrukih koincidencija, za koji je proračunata minimalna detektibilna aktivnost najniža. Značajna je njegova primjena za mjerenje prirodne radioaktivnosti, tim prije što se u lancu raspada uranijuma i torijuma javljaju mnoge intenzivne dvostruke kaskade, ili pak višestruke iz kojih se na odgovarajući način mogu izdvojiti dvostruke koincidencije pogodne za registraciju spektrometrom PRIPJAT-2 M.

LITERATURA

- [1] Андрухович С. К., Берестов А. В., Гутко В. И., Хильманович А. М. (1995): Высокочувствительные многодетекторные гамма спектрометры ПРИПЯТЬ, Препринт Института физики АН БССР, Минск.
- [2] Гольдманский В. И., Куценко А. В., Подгорецкий М. И. (1959): Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. Физмат. Москва.
- [3] Andrukhovich S. K., Berestov A. V., Martsynkevich B. A., Khil'manovich A. M., and Antovich N. (1998): Multidimensional spectroscopy of cascades of photons emitted by quantum objects, *Journal of Applied Spectroscopy*, 65-2: 290 –296.

[4] Берестов А. В., Марцынкевич Б. А., Хильманович А. М. (1988): Определение активности нуклидов методом регистрации интенсивности каскадов γ -квантов различной множественности. Препринт Института физики АН БССР, Минск.

[5] Antović N., Vukotić P., Andruhovič S. K., Berestov A. V., Rudak E. A., Dapčević S. (2001): Radon measurement by coincidence gamma-ray spectrometry, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 249-1: 159-162.