

UNIVERSITATEA DIN BUCUREŞTI
Facultatea de Fizică
Scoala Doctorală de Fizică



Rățoi (Chiroșca) Gianina

EVALUAREA RADIOMETRICĂ A ACTIVITĂȚII
RADIONUCLIZILOR NATURALI.

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific
Prof. univ. dr. Octavian Dului

București, 2017

Declarație

Subsemnata Gianina (Chiroșca) Rățoi, urmând să susțin public teza de doctorat în cadrul Școlii Doctorale de Fizică din Facultatea de Fizică, Universitatea din București, în domeniul fundamental FIZICĂ, domeniul FIZICĂ ATOMICĂ, FIZICĂ NUCLEARĂ, FIZICA PARTICOLELOR ELEMENTARE, ASTROFIZICĂ, APLICATII declar pe proprie răspundere că lucrarea de față este rezultatul muncii mele, pe baza cercetărilor mele și pe baza informațiilor obținute din surse care au fost citate și indicate, conform normelor etice, în note și bibliografie. Declar că nu am folosit în mod tacit sau ilegal munca altora și că nicio parte din teză nu încalcă drepturile de proprietate intelectuală a altcuiva, persoană fizică sau juridică. Declar că lucrarea nu a mai fost prezentată sub această formă vreunei alte instituții de învățământ superior în vederea obținerii unui grad sau titlu științific ori didactic.

Semnătura,

Mulțumiri

Mulțumesc Domnului Profesor Dr. Octavian Dului pentru sprijinul și coordonarea fără de care nu ar fi fost posibilă realizarea acestei teze de doctorat. Alături de Domnul Profesor, transmit pe această cale mulțumirile mele colaboratorilor mei care m-au ajutat în realizarea lucrării D-nei CS II dr. Mihailov Maria-Emanuela și Domnului CS I. dr. Vasile Pătrașcu din cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare Marină ”Grigore-Antipa” din Constanța.

Nu în ultimul rând mulțumesc familiei pentru sprijin și înțelegerea care au făcut posibilă finalizarea acestei lucrări.

Cu deosebită considerație,
Gianina Chiroșca

Cuprins

Declaratie	3
1 Introducere	1
2 Radiația Ionizantă	3
2.1 Noțiuni generale	3
2.1.1 Constanta de dezintegrare	3
2.1.2 Activitatea	4
2.1.3 Timpul de înjumătățire	5
2.1.4 Echilibrul nuclear	5
2.2 Radiometria și Sursele de radiație	6
2.2.1 Fondul natural de radiație	10
2.2.2 Problematica Radonului	14
Radonul în natură	15
Acumularea radonului în locuințe	16
2.2.3 Radonul în apă și subteran	17
2.2.4 Surse antropogene sau instrumentale	17
2.2.5 Radiometrie / Metode Radiometrice	19
3 Detectia și Dozimetria radiațiilor ionizante	21
3.1 Interacția Radiației cu materia	21
3.1.1 Interacția radiației secundar ionizante	22
Interacția fotonilor cu materia	23
Efectul fotoelectric	23
Împrăștierea elastică	24
Împrăștierea incoerentă	25
3.1.2 Radiația primar ionizantă	26
3.2 Dozimetria radiațiilor	26
3.2.1 Kerma - Energia cinetică depusă în aer	27
3.2.2 Parcursul mediu liber și pierderea medie de energie	28
Parcursul mediu liber	28
Pierderea medie de energie	28
3.2.3 Cantități operaționale în dozimetrie	30
Transferul liniar de energie	30
Răspunsul biologic la doză	31
3.2.4 Exponerea la radiație	31
3.2.5 Doza echivalentă - Efectele biologice ale interacției radiației cu materia	32

3.3	Dozimetria radiațiilor	33
3.3.1	Probleme specifice în dozimetria radiațiilor	34
	Dozimetria Radonului	34
3.4	Principii de detecție	35
3.4.1	Mărimi evaluate	35
3.4.2	Optimizarea răspunsului detectorilor	35
3.5	Detectori de radiație	36
3.5.1	Camera de ionizare	38
3.5.2	Spectrometre	40
3.5.3	Clasificarea spectrometrelor și caracteristici	40
	Caracteristici principale ale spectrometrelor	40
	Clasificarea spectrometrelor de radiații gamma	43
4	Metode Experimentale	45
4.1	Aparatura utilizată	45
4.1.1	Cititorul Harshaw 4500 TLD	45
	Specificațiile aparaturii	46
	Principii de detecție	46
4.2	Evaluarea spectrometrică a probelor	48
4.3	Modelarea Transportului Radiației	49
4.4	Modelarea parametrilor detectorilor	49
4.5	Determinări Specifice	50
4.5.1	Evaluarea debitelor de doză în zona Cernavodă	50
	Date și Metode	51
	Rezultate experimentale	52
	Concluzii	53
4.5.2	Evaluarea distribuției dozelor înregistrate în depozitul de deșeuri radioactive de la Băița	58
	Date și Metode	58
	Rezultate experimentale	59
	Concluzii	60
4.5.3	Evaluarea concentrațiilor de radioizotopi comuni în zona maritimă a României	62
	Date și metode	62
	Rezultate experimentale	67
4.5.4	Concluzii	71
5	Concluzii Generale	77
6	Lista contribuțiilor proprii	87
6.1	Lucrări publicate în reviste	87
6.1.1	Reviste cotate ISI	87
6.2	Lucrări prezentate la conferințe	87
6.2.1	Conferințe internaționale	87
6.2.2	Conferințe naționale	87
6.3	Cărți	88

Introducere

Evaluarea activității radionuclizilor naturali în țara noastră sau în întreaga lume prezintă un real interes în special în domeniul medicinii dar și în scopul prevenirii și ținerii sub control a vieții oamenilor.

Prin evaluare radiometrică se înțelege utilizarea unei metode adecvate pentru punerea în evidență a concentrațiilor cât mai mici posibil de radionuclizi prin utilizarea tehnicilor moderne, îmbunătățite și special concepute în acest scop. În cadrul acestei lucrări vom realiza o analiză specifică fiecărui dintre cele 3 cazuri analizate în capitolul 4.

În capitolul 2 al prezentei lucrări am expus pe scurt noțiuni generale de radioactivitate și de evaluare a surselor de radiație cu atenție sporită asupra fondului natural de radiație și a componentei principale a acestuia, Radonul. Tot în acest capitol se discută câteva noțiuni generale de radiometrie și metode radiometrice.

Capitolul 3 vine să completeze noțiunile generale de radioactivitate naturală și artificială introduse în Capitolul 2 și descrie principalele efecte date de radiație și modul în care aceasta traversează materia permisivă astfel descrierea unor noțiuni de detecție și dozimetrie precum și a cantităților operaționale asociate acestor concepte. Tot în acest capitol vom discuta pe scurt principiile de detecție ale celor mai comune tipuri de detectori și variații ale acestora împreună cu aplicațiile lor.

Având noțiunile de detecție și modul de traversare al materiei de către radiație, în următorul capitol descriem pe larg principalele activități experimentale realizate pe parcursul studiilor Doctorale.

Primul studiu presupune evaluarea riscului radiologic aferent expunerii la doze ambientale pentru zona orașului Cernavodă unde se află amplasamentul celei mai importante facilități nucleare din Romania, Centrala Nuclear Electrică Cernavodă. Astfel, am identificat distribuția debitului de doză cu distanța față de această facilitate și am încercat să identificăm o lege a acestei distribuții. Pentru această secțiune am utilizat detectori pasivi, dozimetre TLD care au fost expuse pentru un interval de timp de 3 luni pentru a înregistra doza ambientală. La această lucrare a participat și Laboratorul de Control Mediu de la Cernavodă și rezultatele obținute au făcut parte dintr-o intercomparare astfel încât rezultatele să fie validate și de un laborator extern.

Al 2-lea studiu a utilizat tot detectorii pasivi TLD pentru a îmbunătăți rezultatele

obținute prin metode spectrometrice în interiorul Depozitului de Materiale și Deșeuri Radiologice - DMDR - Băița, Bihor. De data aceasta detectorii au fost utilizati pentru verificare inexistenței câmpurilor de neutroni din interiorul Depozitului și pentru a evalua debitul de doză ambiental pentru fotonii X și radiațiile Beta. Rezultatele obținute au fost în bună concordanță cu studii anterioare și au permis estimarea răspunsului detectorilor și la Radon și descendentei acestuia.

Cel de-al treilea studiu a implicat efectiv metode spectrometrice pentru determinarea concentrațiilor de radionuclizi pentru diferite zone din Manreia Neagră având probe de apă și de sediment marin. Evaluarea spectrometrică a ridicat probleme specifice fiecărui tip de probă în parte, pentru probele de apă fiind necesară utilizarea unei geometrii de eficacitate ridicată (Geometria Marinelli) în care proba imbracă detectorul. Chiar și în acest caz a fost nevoie de utilizarea corecțiilor de eficacitate pentru geometria dată astfel încât timpul de analiză al probelor să poată fi estimat corect. În cazul probelor de apă, timpul de analiză a fost de 60 de ore și au fost puse în evidență concentrații ale principalilor radionuclizi din seriile naturale ale Uraniului și Thorului alături de fragmente de fisiune specifice accidentului de la Cernobal. În cazul probelor de sediment, geometria probei a fost una nestandard, proba fiind amplasată într-un flacon de dimensiuni atipice și în acest caz au fost utilizate corecții de eficacitate astfel încât să putem determina MDA - Activitatea Minim Detectabilă - pentru geometria dată și pentru tipul de probă în parte. Timpul de spectrometru pentru aceste probe a variat între 20 și 36 de ore.

Capitolul 5 vine în completarea concluziilor enunțate la finalul fiecărei lucrări și prezintă modul în care acestea cadrează cu dezvoltările recente și viitoare ale domeniului nuclear și specific al problemelor radiometrice specifice prezenței instalațiilor nucleare dar și a markerilor ce pot fi utilizati pentru trasarea activităților cu material nuclear atât în instalațiile specifice cât și în afara acestora.

Radiatia Ionizanta

Odată cu formarea Pământului au existat și unii radionuclizi care nu s-au dezintegrat complet până în prezent. Cei mai importanți radionuclizi primordiali care se găsesc din abundența în stare naturală sunt: ^{238}U , ^{235}U , și ^{232}Th , precum și produșii lor de dezintegrare ^{40}K și ^{87}Rb [1]. Radiatia ionizantă este acea categorie de radiații (corpusculară sau electromagnetică) care interacționând cu mediul generează acte de ionizare. La un act de interacție radiatia ionizantă poate transfera mediului energie suficient de mare pentru a ioniza atomii compoziți, energia medie fiind de ordinul zecilor de eV. Radiatiile ionizante pot fi caracterizate în funcție de particule încărcate, neîncarcate și electromagneticice. Radiatiile cu particule încărcate sunt reprezentate de radiatiile *alpha* (particule masive - de exemplu nucleu de heliu, ce parcurg în aer doar câțiva centimetri și pot fi stopate de o foaie de hârtie) și radiatiile *beta* (reprezentate de electroni și pozitroni - acestea pot parcurge câțiva metri în aer și pot fi stopate printr-un perete de lemn sau sticlă); radiatiile cu particule neîncărcate sunt reprezentate de neutroni (au putere mare de ionizare dar, ce poate fi atenuată de substanțe hidrogenate - apă sau apă grea); radiatiile electromagneticice reprezentate de radiatia *x* și *gamma* (radiatia *x* formată din fotoni poate fi stopată de ecrane de plumb; radiatia *gamma* formată din fotoni dar de energie mai mare față de radiatia *x* poate parcurge în aer metri de ordinul sutelor iar pentru a fi stopată este necesar de ecrane dense de plumb sau beton).

2.1 Notiuni generale

Materia este formată din atomi grupați în molecule sau structuri cristaline ce formează structurile funcționale cu care suntem obișnuiți. Studiile precum cele realizate de Rutherford au identificat structura nucleului ca fiind format dintr-un nucleu de sarcină pozitivă și unde este concentrată marea majoritate a masei acestuia și un înveliș electronic unde sunt localizați electronii - aceștia supunându-se principiului de incertitudine a lui Heisenberg.

Figura 2.1 prezintă pe scurt schema structurii unui atom. Studiul nostru fiind axat pe fizica nucleară vom evalua în cele ce urmează câteva notiuni generale privind modul în care radiatia ionizantă ia naștere și care sunt cele mai comune unități asociate acesteia.

2.1.1 Constanta de dezintegrare

Deși procesul de dezintegrare radioactivă este un proces statistic, fiindu-i atribuit la începuturile studierii lui un caracter aleator, prin evaluări cu statistică suficientă

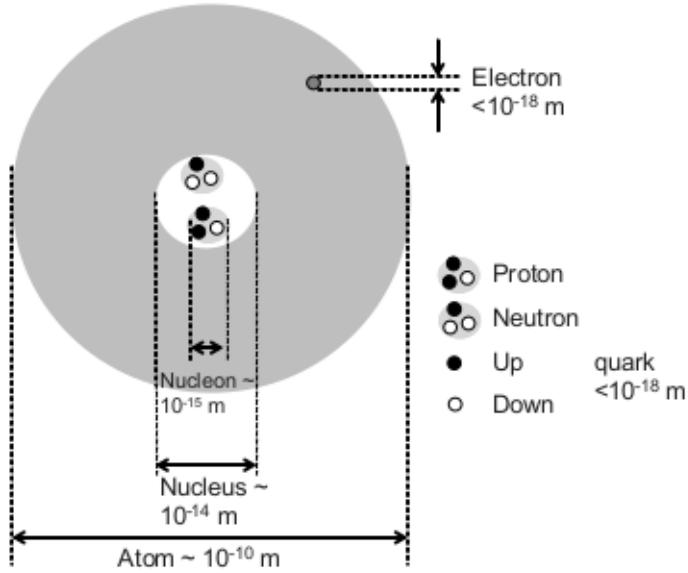


Figura 2.1: Structura atomului ilustrată pentru un atom simplu (se observă prezența atât a particulelor elementare precum și a particulelor cu structură internă) [31]

s-a constatat că fiecărui nucleu îi poate fi atribuit un număr, denumit constantă de dezintegrare și care este legat intrinsec de procesul de dezintegrare al acestuia.

Astfel a apărut **Constanta de dezintegrare** λ ce reprezintă probabilitatea (2.1) ca acel nucleu să se dezintegreze în unitatea de timp. Studii ulterioare au arătat că aceasta este asociată unui anumit radionuclid și până la această dată nu a fost constatată vre-o variație a acesteia cu timpul.

$$p = \lambda dt \quad (2.1)$$

Astfel a fost definită forma diferențială a acestei legi de dezintegrare care pentru un număr de N nucleu inițiale poate fi scrisă ca în ecuația 2.2.

$$-dN = N\lambda dt \quad (2.2)$$

Pornind de la această relație putem deduce soluția ei ca fiind celebra ecuație care ne cuantifică numărul de nucleu ce nu s-au dezintegrat în intervalul de timp dat 2.3.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

2.1.2 Activitatea

În strânsă legătură cu constanta de dezintegrare putem defini o altă mărime de interes ce arată cât de activ este un radioizotop. Astfel:

$$A = N\lambda = N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

Unde A este activitatea, N_0 numărul inițial de nucleu și A_0 este activitatea inițială a radionuclidului nostru.

Unitatea de măsură în sistemul internațional al activității este Bequerel-ul [Bq], denumit după Henri Bequerel și desemnează numărul de dezintegrări suferite de un radionuclid pe secundă. În mod tradițional, activitatea a fost definită într-o unitate diferită - Curie [Ci] - legată intrinsec de activitatea unui gram de Radium. Legătura dintre cele două unități de măsură este prezentată în ecuația 2.5.

$$1Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq \quad (2.5)$$

2.1.3 Timpul de înjumătărire

Prin timpul de înjumătărire se înțelege intervalul de timp pentru care numărul de nucleu dintr-o specie dată de radioizotopi se înjumătărește ca urmare a proceselor de dezintegrare.

$$A = \frac{A_0}{2} \rightarrow \frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda t} \rightarrow T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.6)$$

2.1.4 Echilibrul nuclear

Fie un radionuclid părinte notat cu P respectiv un radionuclid obținut direct prin dezintegrarea părintelui notat cu D . Aceștia au asociat timpii de înjumătărire $T_{\frac{1}{2}^P}$ respectiv $T_{\frac{1}{2}^D}$. Putem defini astfel condiția de echilibru atunci când raportul dintre cei doi radioizotopi nu se mai schimbă. Putem deci scrie următoarea ecuație cunoscută sub denumirea de ecuația Bateman:

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [N_p(0) \frac{\lambda_p}{\lambda_d - \lambda_p} (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_d t})] = 0 \quad (2.7)$$

Această ecuație are o soluție generică de formă

$$t_{max} = \frac{\ln(\frac{\lambda_d}{\lambda_p})}{\lambda_d - \lambda_p} \quad (2.8)$$

există câteva soluții specifice pentru cazurile extreme ale stabilității nucleelor părinte și fiică.

$$\lambda_p < \lambda_d; e^{-\lambda_d t} \ll e^{-\lambda_p t}; \frac{N_p(t)}{N_d(t)} = \frac{\lambda_d - \lambda_p}{\lambda_p} \quad (2.9)$$

$$\lambda_p \ll \lambda + d; \frac{N_p(t)}{N_d(t)} = \frac{\lambda_p - \lambda_p}{\lambda_p} \quad (2.10)$$

Se constată că formula Bateman admite soluții diferite în funcție de modul în care variază λ_p în raport cu λ_d .

2.2 Radiometria și Sursele de radiație

Radiometria reprezintă tehnica de măsurare a radiațiilor electromagnetice incluzând și cele în vizibil. Tehnica radiometrică în optică caracterizează distribuția spațială a intensității câmpului de radiație. Metrologia radiațiilor nucleare include metode și aparate ce permit detectarea și măsurarea radiației.

Atunci când se masoară viteza de numărare și radioactivitatea, metodele și aparatele de măsură se numesc radiometrice, iar dacă sunt măsurate dozele și debitele dozelor metodele și aparatele de măsură se numesc dozimetrice.

O instalație de măsurare a radiației este compusă din:

zona sensibilă sau detector-ul este acea secțiune a ansamblului de detecție unde se înregistrează energia depusă de radiația ionizantă. Pentru că această zonă este cea responsabilă cu transformarea ionizărilor în curent se mai numește și zona sensibilă;

blocurile electronice sunt responsabile pentru preluarea semnalului de la zona sensibilă a detectorului și cu analiza acestor semnale inclusiv eliminarea zgomotului. În cadrul acestei secțiuni din detector se realizează operațiile de tipul Pulse Shape Discrimination [3] sau aplicarea pragurilor de discriminare a evenimentelor detectate (de exemplu, pentru discriminarea radonului de alte tipuri de radiație se impune un prag de 5 MeV asupra incidentelor sau a evenimentelor detectate). Tot în această secțiune se va înregistra în memorie valoarea înregistrată permitând astfel evaluarea și cantitățile operaționale dependente de timp cum ar fi debitul de doză (vezi 3.2);

sistem de afișare a informației rezultate ce realizează interfațarea cu operatorul și poate fi analogic - afișată cu ajutorul unui înregistrator - sau digital - pe ecran cu posibilitatea de a exporta datele;

Unul din detectorii utilizati la măsurarea activității unei surse o reprezintă sonda de scintilatie. Un material scintilator este acela la care energia radiațiilor nucleare deplasează electronii materialului (solid sau lichid) în banda de excitare, electronii reemit imediat energia absorbită de radiație sub forma de fotoni (scintilații), iar electronul reîntorcându-se pe nivelul de valență. Cele mai des utilizate materiale sunt cele cristaline ionice simple, cum ar fi:

sulfura de zinc utilizată de regulă pentru detectarea radiației α) ea a fost utilizată în principal în tuburile fosforescente dar poate fi utilizat și ca scintilator în detecția radiației, el fiind caracterizat printr-o lățime mare a benzii interzise de 3.54eV . De altfel, ZnS a fost folosit și de Ernst Rutherford ca unul dintre primele materiale scintilatoare.

iodura de litiu asemănător florurii de litiu, și iodura de litiu poate fi folosită în detecția neutronilor termici folosind aceeași reacție dată de aceștia cu izotopul ^6Li cedând prin reacția 2.11 energia cinetică mediului.

iodura de sodiu pentru proprietățile ei de detecție ca și semiconductor este folosit ca material de referință în spectrometria γ . Deși detectorii cu Germaniu Hiperpur - GeHP - au o rezoluție energetică mult mai bună decât cei bazați pe NaI

în detrimentul unei eficacități de detecție mai mici respectiv o stabilitate mult mai mare în timp decât detectorii cu dopant - Ge Li - la care apar frecvențe curenți de drift.



Descoperirea radioactivității a dus la obținerea unor beneficii foarte mari pentru dezvoltarea social-economică, în primul rând producția de energie, aplicații în medicină, biologie, agricultură, industrie etc., dar a dat și naștere totodată îngrijorări mondiale asupra consecințelor groaznice ale utilizării militare (bombardamentele din 1945 de la Hiroshima și Nagasaki) și ale accidentelor survenite în funcționarea centralelor nucleare sau din utilizarea energiei nucleare în alte domenii.

1896 A avut loc descoperirea radioactivității de către Antoine Henri Becquerel, pe când studia luminescența unor săruri ale uraniului. 1898 A avut loc descoperirea primelor elemente radioactive – radiu și poloniu de către soții Pierre și Marie Curie, două elemente cu radioactivitate mult mai puternică decât a uraniului.

Radiațiile emise de radionuclizi sunt: particule alfa, particule beta și fotoni gamma. O particulă alfa constă din: doi protoni și doi neutroni legați; ea este astfel o particula grea și are o sarcină egală cu două sarcini elementare. Radiația gamma reprezintă o cantitate discretă de energie, fără masă sau sarcină, care se propagă ca o undă. Radioactivitatea reprezintă transformarea spontană a unor nucleee instabile aflate în stări excitate prin care se schimbă constituția (structura) sau energia internă a nucleelor, prin emisia particulelor alfa, beta (include și captura electronilor) precum și a fotoniilor gamma dar și procese mai complexe cum ar fi fisiunea spontană a nucleelor grele și emisia protonilor și neutronilor întârziati.

După modul de producere a nucleelor stabile sau metastabile, acestea pot avea surse naturale (descoperită în 1896 de H. Bequerel prin studierea radiației emise de nucleele din sărurile de uraniu) sau antropomorfă (artificială – pusă în evidență de soții Curie în 1934 prin bombardarea cu neutroni sau particule încărcate a nucleelor stabile).

Nucleele radioactive se descompun (trec într-o altă stare) respectând legile fenomenelor statistice specifice mecanicii cuantice și astfel probabilitatea de dezintegrare a unui nucleu în unitatea de timp λ , constanta radioactivă, este independentă de factorii exteriori și același pentru toate nucleele aceleiasi specii. Numărul de nuclee dezintegrate în unitatea de timp se poate scrie:

$$dN = \lambda N * dt \quad (2.12)$$

Antoine Henri Becquerel a fost un fizician francez, laureat al Premiului Nobel în domeniul fizicii, în anul 1903, ca urmare a descoperirii fenomenului de radioactivitate spontană. Unitatea fundamentală de măsură a radioactivității a fost denumită mai întâi Curie (Ci) după savantul ce a evidențiat-o. Ulterior, odată cu trecerea la unitățile de măsură naturale, această unitate relativă la un gram de radiu a fost înlocuită cu o valoare generică, mult mai ușor de evidențiat matematic ce reprezintă



Figura 2.2: Radioactivitatea la nivel global [50]

numărul de dezintegrări (indiferent de natura radiației emise) și anume Becquerel (Bq). Corelația dintre unități este descrisă de relația : $1Cu = 3.7 * 10^{10} Bq$. Un becquerel este egal cu o dezintegrare într-o secundă ($1Bq = 1dez/s$). Timpul necesar ca activitatea unui radionuclid să scadă la jumătate (prin dezintegrare) se numește timp de înjumătărire.

$\Lambda = \Lambda_0 e^{-\lambda t}$, unde Λ_0 - activitatea inițială a sursei. Nucleele radioactive (radionuclizi) există oriunde: orice material conține anumite cantități de elemente radioactive (în urme). Anumite componente naturale precum solul, rocile sau apa conțin uneori radionuclizi naturali de origine terestră (sau extraterestră) în concentrații relativ ridicate.

Alături de radionuclizi naturali, în ultima sută de ani, au apărut în mediul înconjurător radionuclizi rezultați în urma reacțiilor nucleare efectuate de către om. În 1919, Ernest Rutherford a realizat prima transmutație nucleară, producând ^{17}O și 1H prin bombardarea azotului ^{14}N cu helioni, reacție care poate duce la apariția de nucleu cu activități gamma importante (de energii mari de 6-9 MeV) și este des întâlnit în reacțiile ce apar la interacția dintre particulele cosmice și atmosfera Pământului.

Radiațiile emise de radionuclizi sunt: particule alfa, particule beta și fotonii gamma. O particulă alfa constă din: doi protoni și doi neutroni legați; ea este astfel o particulă grea și are o sarcină egală cu două sarcini elementare. Radiația gamma reprezintă o cantitate discretă de energie, fără masă sau sarcină, care se propagă ca o undă. Radioactivitatea naturală în zilele noastre reprezintă principala sursă de iradiere pentru oameni. Deoarece radiația naturală se datorează din mai multe cauze naturale, putem vorbi de razele cosmice, inhalarea de radioizotopi din alimente și inhalarea radonului, radiația emanată de sol (radioactivitatea telurică).

Radioactivitatea este un fenomen natural și sursele naturale de radiații sunt caracteristici ale mediului. Radiațiile și substanțele radioactive au multe aplicații utile, începând de la generarea de energie electrică la utilizarea în medicină, industrie și agricultură. Radiația riscurilor lucrătorilor și a mediului, care pot apărea din aceste cereri, trebuie să fie evaluată și, dacă este necesar, controlată.

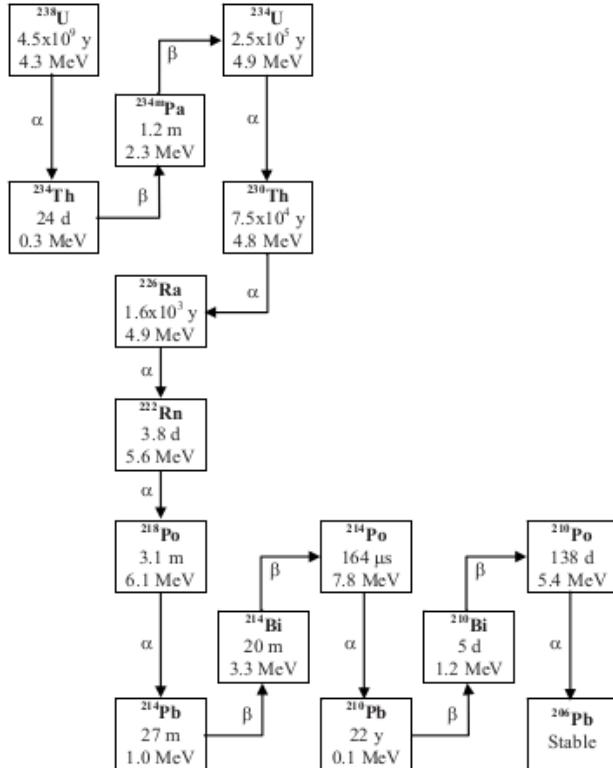


Figura 2.3: Seria naturală a ^{238}U [25]

Radioactivitatea constă din emisia spontană de către anumite nucleu (radioactive) a unei radiații corpusculare ca urmare a unui proces ce are loc la nivelul nucleului, proces ce este denumit dezintegrare radioactivă. Radioactivitatea telurică poate varia de la o regiune la alta cu un factor de 1000 la 1, în funcție de cantitatea de uraniu din sol. Radiația medie datorată emanărilor din sol este de cca 1 mSv pe an, această valoare putând varia de la 0,5 mSv în regiunile cu radioactivitate joasă, până la valori de peste 400 mSv în regiunile cu radioactivitate naturală ridicată.

S-au realizat studii privind doza medie a iradierei naturale din sol și prezintă în paragraful următor date privind acestea, realizate în 1989. În Europa doza medie a iradierei naturale din sol este de cca 1 mSv pe an, la aceasta adaugându-se radiația cosmică naturală și iradierea internă datorată radioactivității conținute în corpul uman.

În Franță și Europa de vest media națională a iradierei naturale este de 1 mSv pe an, în România media națională este de 2,78 mSv pe an, în India 8 mSv pe an, în Brazilia pana la 1,23 mSv pe an (în anumite regiuni), în Iran pana la 1 mSv pe an (în anumite regiuni)[9] deși rapoarte anterioare au prezentat valori mult mai ridicate pentru zonele urbane [52]. Sursele radioactive sunt reprezentate de radiațiile nucleare generate atât prin procedee naturale legate de radioactivitatea indusă sau naturală iar sursele instrumentale prin intermediul dispozitivelor ce sunt bazate pe accelerarea particulelor elementare și interacția acestora cu o țintă formată din elemente cu masă atomică mare și temperatură ridicată de fuziune.



Figura 2.4: Distribuția fondului natural de radiație [52, 9]

2.2.1 Fondul natural de radiație

Fondul natural de radiație este reprezentat de radioactivitatea naturală ce este formată din radionuclizi din mediul înconjurător (apă, aer, sol) odată cu formarea planetei Pământ. Doza radiației pe care o primește un om din surse naturale se datorează radionuclizilor din organism dar și radionuclizilor aflați în mediul înconjurător. Figura 2.4 prezintă distribuția sa așa cum a fost prezentată în rapoartele internaționale [52, 9]. Ca urmare a expunerii la fondul natural de radiație, pentru persoanele din România reglementările naționale [19] introduc o limită de expunere în cuantum de $2,4\text{mSv/an}$ pentru persoanele neexpuse profesional și de 20mSv/an pentru expuși profesionali care operează în facilități nucleare.

Expunerea la radiația ionizantă nu are loc doar în prezența cunoscutelor surse de radiație, mediul înconjurător fiind la rândul său o sursă de radiație. Materia din care este format Pământul conține o cantitate ridicată de radionuclizi, aparținând seriilor de dezintegrare naturale. Aceste serii pornesc de la radionuclizi ca ^{238}U (cunoscută ca seria Radiului), ^{235}U (cunoscută ca seria Actiniului), ^{237}Np respectiv ^{232}Th . În toate aceste serii de dezintegrare există cel puțin un izotop al Ra iar dintre aceștia ^{223}Ra , ^{224}Ra și ^{226}Ra au canale de dezintegrare ce duc la formarea radionuclizilor ^{222}Rn sau ^{226}Rn (Thoron) ducând astfel la apariția Radonului în mediul înconjurător.

Radonul este un radionuclid cu numărul de masă 88 fiind emanat din sol sub formă gazoasă în urma dezintegrării radioizotopilor Radiului. Cel mai stabil radioizotop al radonului are timpul de înjumătățire de 3.8 zile, el fiind un emițător de particule alfa, formând prin dezintegrare $^{218}\text{Po}(t_{1/2} = 3.10\text{min})$ care prin dezintegrare γ trece în $^{214}\text{Pb}(t_{1/2} = 26.8\text{min})$ care la rândul său trece prin dezintegrare β în $^{214}\text{Bi}(t_{1/2} = 19.9\text{min})$. Aceasta din urmă, prin dezintegrare alfa trece în $^{210}\text{Pb}(t_{1/2} = 22.3\text{ani})$. Această cascadă de dezintegrări permite evidențierea Radonului folosind mai multe metode.

Odată cu formarea Pământului au existat și unii radionuclizi care nu s-au dezintegrat complet până în prezent. Cei mai importanți radionuclizi primordiali care se găsesc din abundență în stare naturală sunt: ^{238}U , ^{235}U , și ^{232}Th , precum și produșii lor de dezintegrare ^{40}K și ^{87}Rb [1]. Seria Toriului - Serie naturală conține elemente cu

numerele de masă divizibile prin 4 (seria 4n), cap de serie: ^{232}Th , $T_{1/2} = 1.41 \times 10^{10}$ ani, $\Lambda_s = 4.06 MBq/Kg$, Final de serie: ^{208}Pb (stabil numit și ThD), emanația radioactivă: ^{228}Ra (Toron), $T_{1/2} = 5.76$ ani, 7 dezintegrări α și 5dezintegrări β .

Seria Neptuniului - Serie artificială, conține nuclide cu numerele de masă împărțite la 4 cu rest 1 (seria 4n+1), cap de serie: ^{237}Np $T_{1/2} = 2.14 \times 10^6$ ani, Final de serie: ^{209}Bi , emanația radioactivă: ^{225}Ac (action), 8dezintegrări α și 5dezintegrări β .

Seria Uraniului - cap de serie: ^{238}U $T_{1/2} = 4.46 \times 10^9$ ani $\Lambda_s = 25.4 MBq/Kg$ (uraniu natural), final de serie: ^{206}Pb , emanația radioactivă: ^{222}Rn (radon), 8dezintegrări α și 6dezintegrări β , serie naturală conține elemente cu numerele de masă divizibile prin 4 cu rest 2, (seria 4n+2).

Seria Actiniului - serie naturală, conține elemente cu numerele de masă divizibile prin 4 cu rest 2, (seria 4n+2), cap de serie: ^{235}U $T_{1/2} = 7.04 \times 10^8$ ani, $\Lambda_s = 8 \times 10^4 MBq/Kg$, final de serie: ^{207}Pb , Emanăția radioactivă: ^{223}Rn (radon), 7dezintegrări α și 4dezintegrări β .

Uraniu - se găsește în urme (concentrații de ordinul ppm- părți per milion) în toate tipurile de roci și soluri. Cele mai radioactive roci sunt argilele și șisturile de argilă, iar cele mai puțin radioactive sunt rocile pur chimice și organogene. Uraniul îl găsim în toate tipurile de sol și îngrășăminte fosfatice și din această cauză îl regăsim în legumele pe care le cultivăm și le mâncăm, de aici rezultând și contaminarea oamenilor. Activitatea medie a uraniului ingerat de o persoană/an este în jur de 0.14 mCi.[3].

Thoriu Thoriu este un element chimic natural radioactiv cu numărul atomic 90 și simbol chimic Th, ce se găsește în natură (izotopul său cel mai stabil ^{232}Th , care are un timp de înjumătățire de peste 14 milioane de ani). A fost descoperit de minerologul norvegian Morten Thrane Esmark (1801 - 1882) în 1828, în Norvegia lângă Brevig și identificat de chimistul suedez Jons Jacob Berzelius. Numele de thoriu este o referință la Thor, zeul razboiului în mitologia scandinavă. Thoriu pur este un metal alb argintiu, care este stabil în aer uscat păstrându-și luciul metalic timp de mai multe luni. Atunci când este adus în mediu umed și bogat în oxigen, începe să se oxideze, devenind încet cenușiu, apoi negru. Proprietățile fizice se alterează în funcție de gradul de oxidare al metalului. Thoriu pur este moale, foarte ductil și poate fi laminat la rece. Pulberile metalice de toriu se aprind spontan în aer (piroforice). Thoriu e considerat a fi combustibilul nuclear al viitorului. Cantitatea de toriu estimată din scoarța terestră este de trei – patru ori mai mare decât a uraniului. Minereul principal dincare se extrage toriu este monazitul.

Thorul poate fi folosit în reactoarele de sodiu lichid pentru a produce electricitate. În cadrul acestui proces, în reactoare cu neutroni rapizi, thoriul are capacitatea de a consuma deșeurile uzate (fragmentele de fisiune din pastilele de combustibil ars) de la centralele nucleare bazate pe ciclul Uraniului. India și China au început deja să dezvolte această tehnologie, pentru că, unii specialiști privesc acest element ca pe un producător de energie electrică mult mai stabil – ridicând probleme speci-

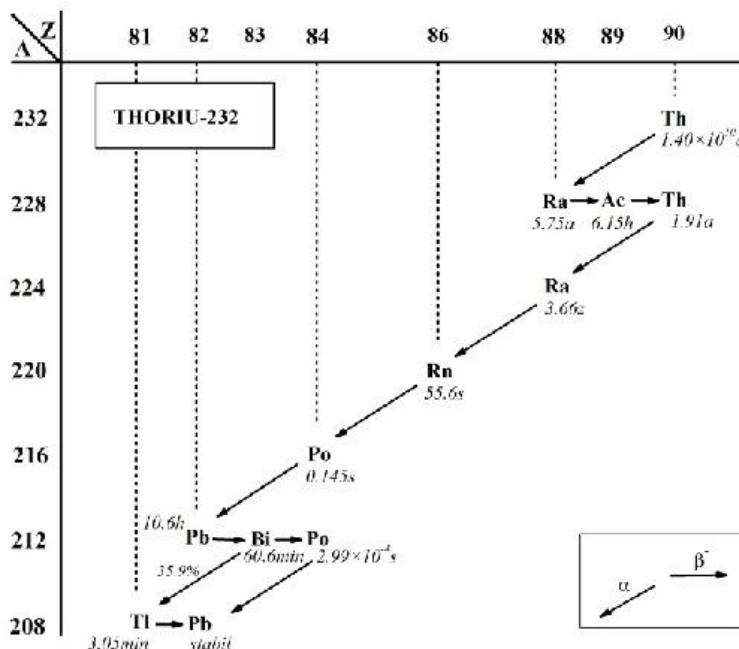


Figura 2.5: Thoriu.[50]

fice pentru designul generațiilor viitoare de reactori, probleme legate în principal de secțiunea eficace constantă pentru procesele de fisiune pentru întreg spectrul de neutroni. Acest aspect este cu atât mai important cu cât sursele alternative - soarele și vântul - au rezultate fluctuante, bazându-se pe condițiile meteorologice.

Radionuclizi naturali (^{40}K , ^{14}C) - importanța acestora, clasificare (radionuclizi naturali de origine terestră, cosmogenă).

K - Potasiul este un element chimic, având numărul de masă 19, este un metal alcalin de culoare alb-argintiu, oxidează ușor în aer, reacționează cu apă generând suficientă căldură pentru a aprinde hidrogenul gazos eliberat, poate reacționa și cu gheață până la temperatura de: $-100^{\circ}C$. În natură este întâlnit sub formă de sare ionică, în apă de mare, sub forma diverselor compuși, ca și substituent al unor minerale. Ionul de potasiu este prezent atât în țesuturile vegetale cât și animale, fiind un oligoelement indispensabil în metabolismul celulelor vii. Concentrația mare de potasiu din plante asociat cu cantitățile foarte scăzute de sodiu din acestea, conduce la izolarea potasiului din cenușa de plante, fiind din punct de vedere istoric factorul ce a condus la numele de potasă.

Potasiul și sodiul sunt metale alcaline, identice din punct de vedere chimic, dar funcțiile acestora în organismele vii fiind diferite, animalele în special folosesc sodiul și potasiul diferit pentru a genera potențial electric în celule, mai exact în țesuturile nervoase. Deficitul de potasiu la om și animale conduce la numeroase disfuncții neurologice. Potasiul poate fi detectat gustativ identi-

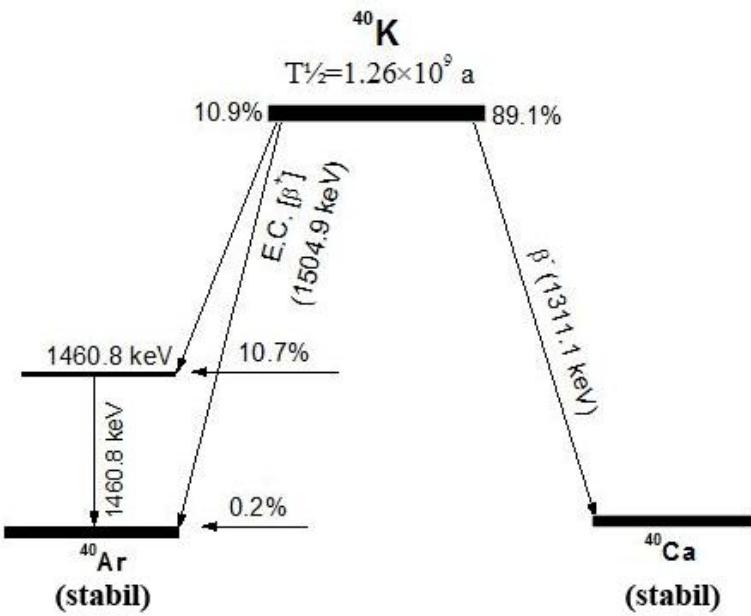


Figura 2.6: Dezintegrarea potasiului.[50]

ficându-l în trei din cele cinci senzații gustative, în funcție de concentrație. Soluțiile diluate ale ionului de potasiu au gust dulce, concentrațiile mai mari sunt acre iar concentrațiile și mai mari devin sărate. Potasiul se folosește ca și supliment medical și ca aplicații agricole (îngrășământ chimic sub formă de clorură de potasiu, sulfat sau azotat de potasiu); aplicații alimentare (ionul de potasiu este un nutriment necesar pentru sănătatea și viața oamenilor); în aplicații biologice (clorura de potasiu utilizată pentru operațiile la inimă, ea oprind activitatea cardiacă); în aplicații științifice și industriale (vaporii de potasiu utilizati în unele tipuri de magnetometre, hidroxidul de potasiu folosit în industrie în neutralizarea acizilor puternici și slabii, având astfel o utilizare în controlul pH-ului; cianura de potasiu folosită în dizolvarea cuprului, aurului și argintului; carbonatul de potasiu folosit în fabricarea sticlei și.a.).

Potasiul are 24 de izotopi cunoscuți, dintre care trei sunt întâlniți în natură în urmatoarele proporții: ^{39}K (93,3 %), ^{40}K (0,0117 %) și ^{41}K (6,7 %). Izotopul ^{40}K se dezintegrează în izotopul stabil ^{40}Ar (11,2% din dezintegrări) prin captură electronică sau emisie de pozitroni, sau se descompune în ^{40}Ca (88,8% din dezintegrări) prin dezintegrare beta; ^{40}K are un timp de înjumătățire de 1.250×10^9 ani. O aplicație a izotopului ^{40}K și ^{40}Ar este folosită în datarea rocilor, o altă aplicație a izotopilor de potasiu a fost folosită în meteorologie. Într-un corp uman cu masa de 70 de kg circa 4400 de nuclei de ^{40}K sunt dezintegrați în fiecare secundă.

^{14}C sau carbon radioactiv este un radioizotop de carbon cu nucleul atomic format din 6 protoni și 8 neutroni. Prezența lui în materiile organice a stat și stă la baza datării cu radiocarbon, această metodă fiind folosită la datarea arheologică și geologică. A fost descoperit de Martin Kamen și Sam Ruben în anul 1940, fiind sugerat de către Franz Kurie încă din 1934. În natură

există trei izotopi de carbon, 99 % fiind reprezentat de ^{12}C , 1 % ^{13}C iar 0,00000001% reprezintă ^{14}C din carbonul atmosferic. Timpul de înjumătățire este de 5.730 ± 40 de ani, masa atomică este aproximativ 14,003241, se descompune în nitrogen-14 prin beta-îmbătrânire. Cea mai mare rată de producție a carbonului 14 se află la altitudini foarte mari (9-15 km) și latitudini cu geomagnetism crescut, amestecându-se ușor și devenind egal distribuit în atmosferă reacționează cu oxigenul și astfel formând radioactiv dioxidul de carbon, acesta din urmă se dizolvă în apă și pătrunde foarte ușor în mări, oceane.

În biosfera pământului ^{14}C este de aproximativ 300 milioane Curie, o mare parte din el aflându-se în ocean. Datarea cu carbon este o metodă de datare radiometrică ce folosește ^{14}C pentru a determina vîrstă materiilor carbonice pâna la 60 mii ani vechime. Tehnica a fost dezvoltată de Willard Libby și colegii lui în anul 1949, acesta a estimat că radioactivitatea carbonului-14 ar fi de aproximativ 14 dezintegrări pe minut per gram. În 1960 Willard a fost premiat cu premiul Nobel în chimie pentru activitatea sa. În corpul uman ^{14}C se află în aceeași concentrație ca și în atmosferă, beta transformarea acestuia intern contribuie cu aproximativ 0,01 mS/an, echivalentă dozei de radiații ionizante a fiecarei persoane. [41].

2.2.2 Problematica Radonului

Radonul este un gaz radioactiv rezultat din dezintegrarea radiului, iar radiul este provenit din dezintegrarea uraniului. Radonul a fost descoperit de fizicianul german Friedrich Ernst Dorn în 1900, numindu-l emanația radiului. În 1908 Ramsay și Gray îl numește niton, izoland elementul și determinându-i densitatea, găsindu-l ca cel mai greu gaz cunoscut până atunci. Acesta este în esență inert și ocupă ultimul loc în grupa zero a gazelor din tabelul periodic al elementelor. Din 1923 a fost numit radon.

^{222}Rn este un gaz radioactiv cu timpul de înjumătățire de 4 ore. Radonul este prezent în sol, în atmosferă în proporții diferite. Radonul difuzează prin porii și fisurile rocilor, o parte fiind eliberată în atmosferă, de unde îl inhalăm. Odată cu creșterea presiunii atmosferice radonul e eliberat mai repede din sol. Valorile radonului difera de la o zonă la alta în funcție de conținutul de uraniu al solului și de vreme. În atmosferă radonul ajunge difuzând din sol, această exhalatie formând de fapt fluxul de radon al scoarței pământului. Radonul și descendenții acestuia pot fi emanați și de materialele de construcție folosite la case, blocuri, clădiri diverse.

Una din problemele importante dezbatute la ora actuală o reprezintă impactul radonului asupra organismului uman și animal, analizându-se și evidențindu-se activitatea radonului în domeniul sănătății și securității radiologice. Medicii de specialitate (medicina muncii și igiena radiațiilor) examinează și supraveghează orice persoană expusă profesional la radiații ionizante, care a primit doze mai mari decât cele prevăzute la Art.22 din NFSR-2000. Dozele cumulate la care se pune problema aparției unui cancer profesional radioindus, pe perioada de activitate, propuse de UNSCEAR sunt de minim 20 mSv/an. De câțiva ani este studiată și mediatizată

această problemă care trebuie rezolvată sau se încearcă rezolvarea ei prin anumite măsuri de prevenție și control. Este o problemă destul de serioasă și foarte importantă, deoarece viața noastră depinde de aceasta, mai bine spus sănătatea oamenilor, care poate fi îmbunătățită și controlată. Cancerul se datorează procesului de transformare a celulelor, proces ce se realizează în mai multe stadii și reprezintă rezultatul interacțiunii factorilor genetici împreună cu agenți externi (radiații ultraviolete și ionizante, contaminanți alimentari, contaminanți ai apei...).

Datorită timpului mare de injumătățire, Radonul este inhalat și expirat de multe ori fără a genera niciun fel de iradiere, dar în cazul în care acesta se dezintegrează la nivelul plămânilor nivelul de contaminare internă furnizat poate fi unul considerabil. Mai mult, prin natura sa, Radonul are o afinitate ridicată pentru atașarea la aerosoli sau la alte materiale expuse în încăperi rămânând astfel un timp îndelungat în zona în care a fost emanat de sol. Nivelul de contaminare astfel obținut poate fi considerabil în cazul arhivelor sau bibliotecilor unde ventilația nu este una optimă. Conform rapoartelor internaționale [9], după fumat, expunerea la Radon din spațiile lucrative sau cele rezidențiale sunt responsabile pentru 10% din cazurile de cancer pulmonar. Tot aceste rapoarte prezintă principalele componente ale radiației naturale de fond. Din acest fond fac parte următoarele componente majore:

Radiația cosmică particulele accelerate în spațiul cosmic generează la nivelul Pământului cascade hadronice și electromagnetice (în funcție de energia particulelor incidente) ducând astfel la înregistrarea de particule relativiste la nivelul solului. Energia incidentelor poate varia între 10^8 eV. Acestui tip de radiație sunt expuși în principal participanții la zborurile aeriene deoarece nivelul de protecție la radiația cosmică depinde de grosimea atmosferei prin care acestea trebuie să se propage.

Radiația telurică în această categorie intră și ^{222}Rn și cuprinde toți radionuclizi prezenți în seriile radioactive naturale. **Un caz special este cel al ^{40}K care are o linie γ de 1,4 MeV și este pregnant la nivelul materiei organice.** Valorile medii ale activității, lor înregistrate sunt $\Lambda_{238U} = 33Bq/kg$, $\Lambda_{226Ra} = 32Bq/kg$, $\Lambda_{232Th} = 45Bq/kg$ respectiv $\Lambda_{40K} = 412Bq/kg$. Media globală pentru acest tip de radiație este de $58\frac{nGy}{h}$ pentru spațiile deschise.

$$I = \frac{C_{226Ra}}{300 * bq * kg^{-1}} = \frac{C_{232Th}}{200 * bq * kg^{-1}} = \frac{C_{40K}}{300 * bq * kg^{-1}} \leq 0.5 \quad (2.13)$$

Radonul în natură

Există multe aspecte de importanță deosebit de mare în ceea ce privește studiile legate de radon, eu enumerandu-vă câteva în acest raport. Primul aspect ar fi cel legat de prezența radonului în apele subterane (fântâni, ape minerale, ape geotermale etc...) iar cel mai important lucru este cunoașterea dozei de radiații primite de oameni prin folosirea acestor surse de apă (ingestie, tratament balnear...) și deosebit de important în studiile de geofizică. Al doilea aspect important e cel legat de fluxul de radon provenit din scoarța terestră, mai exact anomaliiile produse ce pot

pune în evidență aglomerări de substanțe radioactive sau falii tectonice. Se experimentează, luându-se în considerare posibilitatea prevederii cutremurelor cu epicentre localizate determinând variațiile temporale ale fluxului de radon, a concentrației din sol a radonului și din apele din adâncime [16].

Cercetarea radonului are o importanță deosebită atât în legătura cu sănătatea oamenilor dar și în geofizică, în utilizarea unor tehnici de monitorizare în studiul erupțiilor vulcanice, ghețarul Scărișoara ne oferă teme de cercetare deosebite reprezentând dozarea radonului. Masurările de radon de interior a dus la dezvoltarea a diferite modele teoretice și s-au efectuat și se efectuează în continuare cercetări experimentale privind migrarea și acumularea radonului în locuințe, tehnici de remediere a radonului în locuințe din zona minelor de uraniu prin cercetări inovatoare cu cooperare internațională.

Alt aspect foarte important este cel legat de radonul din interiorul locuințelor. Dacă afară concentrația radonului este în medie de $4 - 8 \text{ Bq}/\text{m}^3$, aceasta depinzând de condițiile meteo și de zona geografică (munte, șes, câmpie), în interiorul clădirilor, prin acumulare, poate produce valori între $20 - 80 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Valori mărite putem observa în minele de uraniu, în cazul lucrărilor în subteran, în industria materialelor fosfatice și.a. Raportul dintre numărul de atomi astfel situați și numărul total de atomi de radiu, prezenti în probă, se numește coeficient de emanație sau putere de emanație. Există un domeniu foarte vast în care variația acestei mărimi este de la 0,02 pentru lava la 0,76 pentru soluri. Acest coeficient de emanație reflectă de fapt, raportul dintre suprafață și volumul probei de sol, (adică porozitatea probei).

Acumularea radonului în locuințe

În legătură cu materialele de construcții folosite pentru realizarea construcțiilor s-a interzis conform Ordinul Ministrului sănătății nr. OMS 381/2004 [36] producerea, importul și furnizarea acestora, având în produsul finit concentrații ($\text{Bq} * \text{Kg} - 1$) în ^{226}Ra , ^{232}Th și ^{40}K care nu respectă relația 2.13.

O importanță deosebită în viața omului de zi cu zi, fie la muncă, acasă sau în alte spații închise, o are aerul pe care îl respiră în orice minut. Conținutul de radon din aerul din încăperi depinde de mai mulți factori, din care putem enumera pe cei pe care îi considerăm foarte importanți:

- conținutul de radiu al materialelor de construcție;
- lungimea de difuzie a radonului, raportată la materialul de construcție folosit;
- factorul de emanație al materialelor de construcții, prin care înțelegem raportul dintre activitatea radonului emanat din material și activitatea radonului total existent în material;
- densitatea materialului de construcție;
- grosimea peretilor;
- afluxul de convexie spre interiorul încăperii prin materialul de construcții datorită scăderii de presiune sau a variației de temperatură;

- tipul constructiei: modul în care e proiectata casa sau clădirea, suprafața de contact cu solul, dacă sunt prezente în pereți fisuri sau în podea, afecteaza concentrația radonului din interiorul acestor construcții;
- viteza de aerisire a locuințelor (timpul necesar pentru scăderea concentrației de Radon din interiorul locuinței sub limita general acceptată);
- conținutul de ^{226}Ra al solului de sub încăpere;
- caracteristicile solului: concentrația de radon este dependentă de conținutul de uraniu din sol, respectiv de permeabilitatea solului;

2.2.3 Radonul în apă și subteran

Există multe aspecte de importanță deosebit de mare în ceea ce privește studiile legate de radon, eu enumerandu-vă câteva în acest raport. Primul aspect ar fi cel legat de prezența radonului în apele subterane (fântâni, ape minerale, ape geotermale etc...) iar cel mai important lucru este cunoașterea dozei de radiații primite de oameni prin folosirea acestor surse de apă (ingestie, tratament balnear...) și deosebit de important în studiile de geofizică. Al doilea aspect important e cel legat de fluxul de radon provenit din scoarța terestră, mai exact anomaliiile produse ce pot pune în evidență aglomerări de substanțe radioactive sau fali tectonice. Se experimentează, luându-se în considerare posibilitatea prevederii cutremurelor cu epicentre localizate (la noi în țară epicentrele sunt localizate în zona Vrancea și Buzău) determinând variațiile temporale ale fluxului de radon, a concentrației din sol a radonului și din apele din adâncime.

Alt aspect foarte important este cel legat de radonul din interiorul locuințelor. Dacă afară concentrația radonului este în medie de 4-8 Bq/m³, aceasta depinzând de condițiile meteo și de zona geografică (munte, șes, câmpie), în interiorul clădirilor, prin acumulare, poate produce valori între 20-80 Bq/m³. Valori mărite putem observa în minele de uraniu, în cazul lucrărilor în subteran, în industria materialelor fosfatice și a.

Raportul dintre numărul de atomi astfel situați și numărul total de atomi de radiu, prezenti în probă, se numește coeficient de emanație sau putere de emanație. Există un domeniu foarte vast în care variația acestei mărimi este de la 0,02 pentru lava la 0,76 pentru soluri. Acest coeficient de emanație reflectă de fapt, raportul dintre suprafață și volumul probei de sol, (adică porozitatea probei).

2.2.4 Surse antropogene sau instrumentale

Una dintre principalele probleme dezbatute la ora actuală la noi în țară și în lume o reprezintă poluarea mediului în care trăim și felul în care noi toți suntem obligați moral față de noi și față de generația viitoare ca să poată trăi într-un mediu natural în care iradierea produsă de radioactivitatea artificială (provenind de la o centrală nuclearo-electrică) este neglijabilă și nepoluantă.

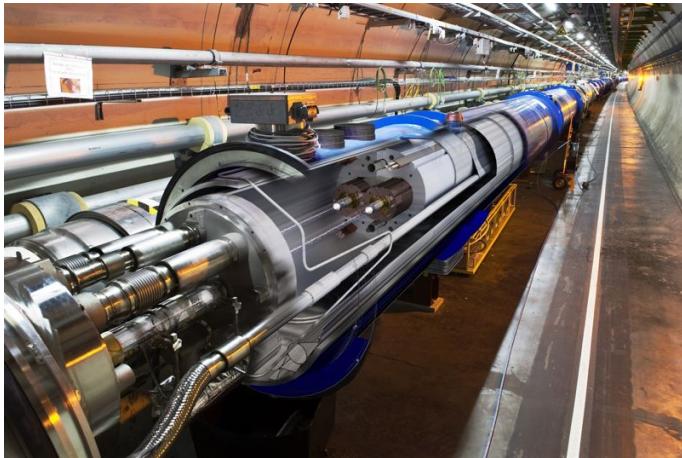


Figura 2.7: Ansamblul Large Hadron Collider

Cel mai important și periculos incident petrecut până acum provenind de la o centrală nuclear-o electrică a fost accidentul de la Cernobâl.

Norul radioactiv de la Cernobâl a constat din două radioelemente și anume: ^{137}Cs (Cesiu) și ^{131}I (Iod), primul având timpul de înjumătățire de 30 de ani iar al doilea timpul de înjumătățire fiind de 8 zile.

Depunerile radioactive de la Cernobâl au fost detectate la mii de kilometri depărtare. În Franța, nivelul radioactivității la care a fost supusă populația câteva zile după accident a atins circa 0,015 mSv/zi (aproximativ de patru ori nivelul fondului de 0,0036 mSv/zi) iar la două săptămâni după accident radioactivitatea atmosferică a revenit practic la normal. În medie un francez a primit aproximativ o doză de 0,1 mSv care poate fi atribuită accidentului de la Cernobâl, reprezentând o zecime din fondul natural de radiație pe care îl primește în fiecare an [18].

În general, Cesiul radioactiv îl găsim în alimente, în mod special se găsește în ciuperci, deoarece ciupercile absorb foarte ușor cesiul, dar și în sol.

Exemple de surse instrumentale: - acceleratorul liniar de particule,

Unul dintre cei mai importanți producători de radionuclizi sunt Centralele Nucleare folosite la producerea enregiei Electrice, în principal datorită efluenților ce conțin cantități reduse de radionuclizi (de multe ori, activitatea acestora se află la limita inferioară de detecție pentru aparatura modernă). Fiecare tip de centrală are particularitățile și vulnerabilitățile lor, astfel, reactorii de tip CANDU 600 cum sunt cei din Centrala Nuclearelectrică de la Cernavodă, au efluenți de foarte slabă activitate doar că, în caz de incident sau de accident, acestea prezită un potențial de risc asociat efluenților bogăți în tritiu.

Alte tipuri de reactori prezită un risc ridicat dat de efluenții radioactivi de durată mare de viață - în special reactorii ce folosesc combustibil îmbogățit fie că folosesc



Figura 2.8: Centrala nucleară de la Cernavodă.



Figura 2.9: Centrala de la Cernobâl din imediata vecinătate a orașului Pripyat.

moderator lichid (reactorii de tip PWR¹), gazos (filierele GCR² folosesc gaze inerte pentru răcirea zonei active a reactorului și pentru generarea energiei electrice) sau solid (Reactorii de tip RBMK³).

Reactorii nu prezintă de regulă un risc de mediu, ei fiind de altfel amplasati în apropierea orașelor, dar în caz de accident pot genera concentrații ridicate de material radioactiv, cel mai cunoscut caz fiind al Reactorului numărul 4 de la Centrala Nuclear Electrică și de Cercetare de la Cernobil, o centrală ce avea reactoare de tip RBMK. Accidentul de la Cernobil a dus la emisia de radioizotopi importanți în mediu, aceștia putând fi determinați în concentrații însemnante și la 25 de ani de la accident. Incidentul de la Cernobil a dus la evacuarea orașului asociat, Pripyat.

2.2.5 Radiometrie / Metode Radiometrice

Până la ora actuală, în funcție de locația unde se evalează cantitățile operative se vor utilizeaza metode radiometrice specifice:

¹Reactori de tipul Pressurized Water Reactor ce folosesc ca moderator și lichid de răcire apa ușoară aflată sub presiune

²Reactorii de tip GCR - Gas Cooled Reactor

³O generație de reactori ce folosesc ca moderator grafitul, de regulă de producție rusească, cel mai cunoscut tip de reactor fiind cel de la Cernobil respectiv de la Kozloduy Nuclear Powerplant din Bulgaria, acesta din urmă fiind în continuare operational

Sol Probele de sol sunt de regulă evaluate prin metode spectrometrice și se urmăresc în principal seriile naturale. Orice discrepanță înregistrată în concentrațiile de echilibru ale acestor serii poate fi o indicație directă a unei contaminări externe.

Aer Analiza probelor de aer ridică probleme specifice, în special datorită aerosolilor și a diferențelor date de prezența acestora precum și a parametrilor termodinamici ai sistemului atmosferic ce urmează a fi analizat. De regulă se folosesc detectori specifici pentru evaluarea fiecărui tip de radionuclid în parte, prin protocoale și metode specializate [21] (cum ar fi depunerea pe filtre și analiza prin metoda integrală în cazul Radonului dar și a altor gaze cum este cazul nucleelor de ^{137}Cs).

Biota Pentru analiza concentrațiilor de radionuclizi în materia vie - fie că vorbim despre regnul vegetal sau animal sunt utilizate metode spectrometrice de eficacitate foarte mare după ce în prealabil probele au fost deshidratate și calcinate.

Apă prezența radionuclizilor în apă ridică probleme specifice datorate în principal autoabsorbției raidiației emise de aceștia în volumul surse precum și împărăștierile care apar în acestea. Din acest motiv, analiza spectrometrică a probelor de apă presupune calibrări specifice și calcului coeficienților de absorbție respectiv de atenuare în probă. Aceste calcule sunt realizate de regulă prin utilizarea codurilor de calcul al Monte-Carla a Transportului Radiativ.

Fiecare metodă are o procedură de monitorizare, măsuratori, calibrarea instrumentelor, proceduri de procesare a datelor, erori.

Detectia și Dozimetria radiațiilor ionizante

Una dintre cantitățile de bază în evaluarea interacției dintre radiația ionizantă și materie o reprezintă doza sau cantitatea de energie depusă de câmpul de radiație în unitatea de masă. Această cantitate depinde atât de natura sau compoziția câmpului de radiație și caracteristicile mediului cu care aceasta interacționează. Această interacție este descrisă pe larg prin relația Bethe-Bloch 3.9.

Dozimetria ca și radioprotecția reprezintă două domenii cu o dinamică activă, unde prin intermediul descoperirilor recente sunt îmbunătățite cantitățile și operatorii folosiți în dozimetrie și radioprotecție. Ca și exemplu, putem spune că cel mai longeviv set de astfel de parametri, prezențați în ICRP 74, sunt înlocuiți în anul 2007 cu o versiune nouă (care este rezultatul a multor ani de muncă în studiul și evaluarea efectelor radiației ionizante asupra materiei organice sau anorganice), denumită ICRP 103 [30]

3.1 Interacția Radiației cu materia

Radiația reprezintă procesul în care particulele subatomice sau undele electromagnetice se deplasează printr-un mediu interacționând cu acesta printr-un transfer de energie.

Cu toții ne întrebăm ce anume se întâmplă cu particulele de radiație care traversează substanța, dacă pierde energie și câtă pierde pe unitatea de lungime, dacă particulele sunt deviate și ce distanțe parcurg, cum sunt ele absorbite, ce se întâmplă cu substanța atunci când are loc trecerea radiației, dacă apar schimbări de structură, ionizări, radioactivități secundare și.a.

Principala interacție prin care o particulă încărcată grea, pierde energie în substanță o reprezintă interacția columbiană cu electronii.

Ca și o primă clasificare a radiației (după natura componentelor) avem o radiație corpusculară și o radiație electromagnetică.

O altă clasificare a radiației, din punct de vedere al transferului energetic final asupra materiei, se referă la radiația ionizantă și la radiația neionizantă. Radiația corpusculară este reprezentată de particule subatomice care au masă de repaus și pot avea sau nu sarcină electrică, deci radiația corpusculară poate fi încărcată electric sau poate fi neutră (neutronii).

Radiațiile corpusculare încărcate electric pot fi: particulele α , β , particula α reprezintă nucleul de heliu, rezultat din dezintegrarea radioactivă de tip alpha și este formată din două sarcini elementare pozitive iar masa este egală cu patru unități atomice de masă.

Radiația corpusculară este emisă în urma unei dezintegrări radioactive de către nucleonii redistribuiți dintr-un nucleu și poate fi formată din electroni, pozitroni, nuclee de heliu, nuclee ușoare, fragmente de fisiune. În cazul majorității nucleelor radioactive emisia radiației corpusculare este însotită de emisia unei radiații gama dedezexcitare.

Radiațiile ionizante (radiațiile α , β , fragmentele de fisiune) sunt generate în procese de dezintegrare radioactive, exceptie făcând protonii și parțial neutronii.

Radiația electromagnetică constă din fotoni a căror spectru este foarte mare (spectru ce cuprinde în domeniul lungimilor de undă un ecart de 14 ordine de mărime) și transferă mediului pe care îl străbate energia, după o multitudine de mecanisme de interacție.[25].

Datorită masei mici a electronului și pozitronului are loc trecerea acestora prin substanță fiind totodată și principala deosebire a lor față de celealte particule încărcate.

Tot datorită masei mici, electronul din fascicolul de radiație la trecerea prin substanță își va schimba impulsul la fiecare ciocnire. Odată cu ciocnirea electronul poate pierde energie și prin emisia de radiație electromagnetică (de frânare).

3.1.1 Interacția radiației secundar ionizante

În general, interacția primară este dată de acele elemente care au sarcină și masă (interacționează electromagnetic) cu materialul pe care îl străbat. Astfel, radiația cu sarcină are ca și interacții caracteristice acele interacții date cu învelișul electronic al atomilor și mai puțin cu nucleul în sine. Acest tip de interacție este denumit în general împrăștiere și în funcție de modul în care radiația își păstrează energie (sau în unele cazuri numerele cuantice) poate fi elastică sau inelastică [31].

Datorită pierderii constante de energie particulele primar ionizante sunt stopate complet și absorbite de mediul străbătut. Parcursul particulelor primar ionizante este întotdeauna finit și dependent de energia particulei incidente, el fiind parcurs până la oprire (parcurs liniar mediu).

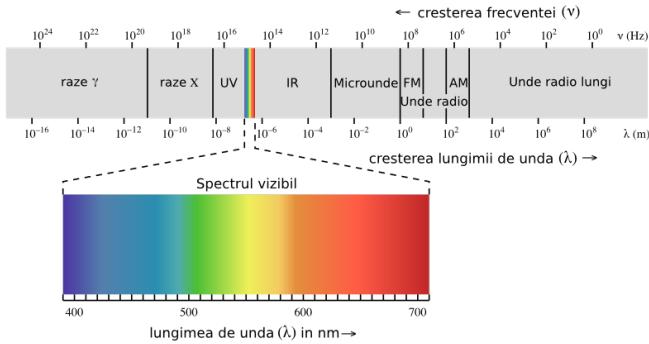


Figura 3.1: Clasificarea fotonilor funcție de energia specifică pentru toată plaja de energii detectabile. [26]

Interacția fotonilor cu materia

Interacția fotonilor cu materia este de natură electromagnetică, fotonii neavând sarcină electrică nu suferă acțiunea forțelor columbiene de distanță lungă și neavând masă de repaus ei pot exista doar cu viteza luminii, iar din această cauză nu putem vorbi de încetinirea cuantelor gama în substanță.

Deoarece radiația gama are lungimea de undă mică interacția cu atomii substanței o putem descrie doar cu ajutorul electrodinamicii cuantice.

Fotonii din domeniul radiațiilor x și γ transferă energie mediilor materiale prin anumite procese, și anume:

- Efectul fotoelectric
- Împrăștierea Compton
- Producerea de perechi

Efectul fotoelectric

Efectul fotoelectric reprezintă interacția dintre un foton și un electron legat în atom, în urma căruia fotonul dispare iar electronul este eliberat din atom cu energia $K = E_\gamma - B_e$ unde E_γ reprezintă energia fotonului incident iar B_e reprezintă energia de legătură a electronului în atom.

Efectul fotoelectric apare întotdeauna în interacția cu electroni legați, pentru că electronul liber nu poate absorbi în totalitate energia unui foton, conservând impulsul iar nucleul își preia o parte din impuls, respectând legile de conservare a impulsului și energiei.

Secțiunea eficace de producere a efectului fotoelectric crește odată ce energia fotonului se apropiă de energia de legătură a electronului de tip K. Se observă că secțiunea eficace a procesului de ionizare are un maxim la energii de legătură a electronilor

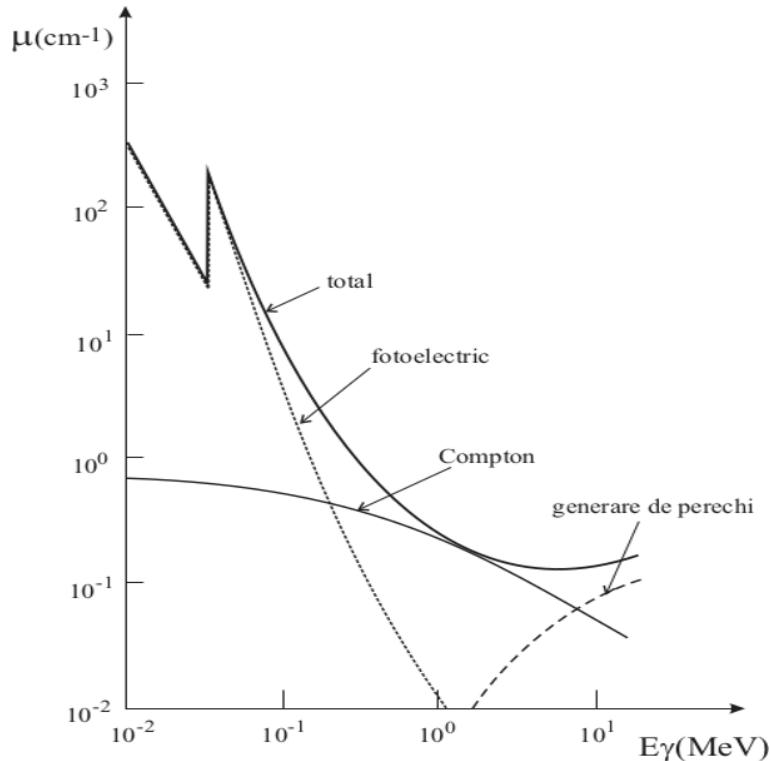


Figura 3.2: Coeficienții liniari de atenuare a radiației γ pentru procesele posibile funcție de energia incidentei. [6]

de pe pătura K. Deoarece electronii de pe celelalte pături au o energie de legătură mai mare, sunt mai puternic legați de atom, secțiunea eficace scade abrupt odata cu creșterea energiei.

Întâlnim situații similare atunci când fotonii au energii apropiate de energia de legătură a electronilor în celelalte pături atomice (L,M și a.). În urma interacției fotoelectrice rezultă o vacanță în păturile atomice care poate conduce la emisia razelor X sau a electronilor Auger. Acest tip de proces este cel mai probabil pentru energii scăzute ale radiației gamma incidente.

Împrăștierea elastică

Împrăștierea elastică reprezintă procesul în care particulele incidente ating ținta și energia cinetică a sistemului rămâne constantă. Trebuie să remarcăm faptul că împrăștierea elastică nu implică faptul că nu există niciun transfer de energie între particulele incidente și particulele țintă.

Particula incidentă poate să cedeze o parte din energia particulei țintă. Energia nu intră în niciun proces de excitare al țintei cum ar fi păturile nucleare respectiv electronice, rămânând neafectate.

Cel mai bun model matematic de împrăștiere elastică este considerat atât particula incidentă cât și particula țintă fără nicio structură internă, aceste particule referindu-

se de fapt la particulele elementare.

Există de asemenea diferite tipuri speciale de procese elastice în care particula incidentă nu transferă deloc sau transferă o energie minimă între ei.

Un exemplu comun îl reprezintă împrăștierea Rayleigh sau dispersia Rayleigh, împrăștierea elastică a luminii (a radiației electomagnetică) de către particule de dimensiuni mult mai mici față de lungimea de undă a radiației. Dispersia Rayleigh nu schimbă starea materiei deoarece aceasta este un proces parametric, proces în care particulele pot fi reprezentate de atomi sau molecule.

Cel mai des poate fi întâlnită în gaze, dispersia rezultând din polarizarea electrică a particulelor, câmpul electric oscilant al undei de lumină acționând asupra încărcăturii unei particule le face să se miște la aceeași frecvență, particula devenind un dipol mic și radiant ale cărui radiații le putem observa ca lumină dispersată.

Efectul Compton constă în împrăștierea fotonilor pe electronii liberi, electroni considerați liberi atunci când fotonii incidenti au energii de ordinul keV, fotoni ce nu dispar după împrăștierea Compton ci își schimbă doar energia și direcția de mișcare, energie ce se modifică cu o cantitate și preluată de electron.

Efectul Compton este un proces de ionizare a atomului fiind o urmare a interacției directe dintre un foton și un electron legat din atom, fotonul cedând întreaga energie electronului este absorbit în material.

Generarea de perechi este procesul de interacție a unui foton cu un nucleu sau electron, în care dispare fotonul și apare perechea electron-pozitron.

1 Generarea de perechi este un proces cu prag, fotonul trebuind să aibă energie de cel puțin 1.022 MeV pentru a avea loc.

Efectul formării de perechi este procesul invers fenomenului de anihilare și reprezintă de fapt transformarea cuantei γ într-o pereche antiparticulă (electron-pozitron), în câmpul columbian al unei alte particule. Nu putem vorbi de o încetinire a fotonilor (ei există doar cu viteza luminii), ei pot fi absorbiți în substanță sau împrăștiați la unghiuri mari cu ajutorul măririi lungimii de undă. Deoarece cuantele γ interacționează slab cu electronii din substanță acestea pot fi deosebit de penetrante, iar ca o urmare a trecerii prin substanță putem spune că avem o atenuare a fasciculului de radiații (nu absorbția lui).

$$K_{e^-} + K_{e^+} = (mc^2)_{e^-} + (mc^2)_{e^+} = E\gamma - 1.022\text{MeV} \quad (3.1)$$

unde, k reprezintă energia cinetică.

Împrăștierea incoerentă

În procesul de împrăștiere inelastică particula incidentă excită atomul la o stare electronică sau nucleară mare, care de obicei se întoarce la starea inițială emittând

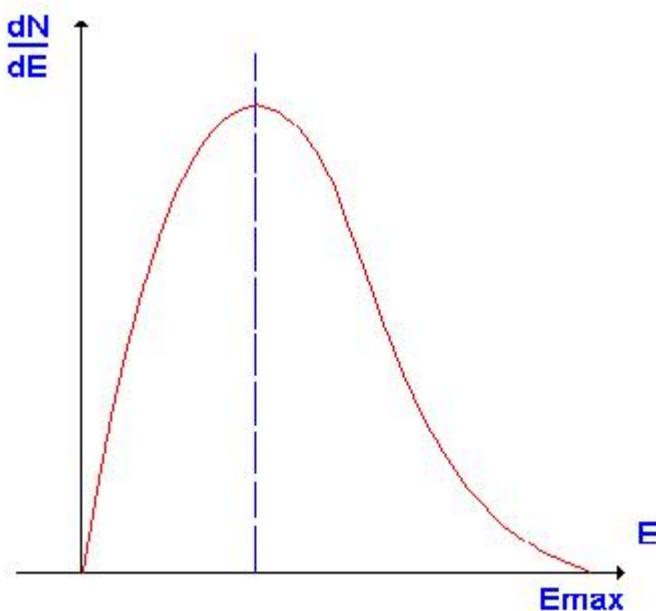


Figura 3.3: Spectrul radiatiilor beta.[50]

una sau mai multe particule.

În acest tip de reacție energia cinetică nu se conservă, deoarece o parte din energie merge în procesul de excitație dar energia totală a sistemului ramâne constantă.

3.1.2 Radiația primar ionizantă

Radiația primar ionizantă interacționează cu mediul în care se propagă în mod direct, fără mijlocirea unei alte particule. În general, acest tip de radiație are sarcină și masă de repaus. Din această categorie fac parte radiația β^+ , β^- , protonii și nucleu sau ioni - cum ar fi radiația $\alpha - {}_2^4 He$ precum și ionii mai grei. De regulă aceștia provin din interacția radiației cosmice cu natura sau în facilități nucleare și nu sunt comune fondului natural de radiație la nivelul solului. În figura de mai jos vă prezint spectrul unei radiații β^- :

3.2 Dozimetria radiațiilor

Energia depusă de radiație în materiale poate induce diverse efecte în acestea și evaluarea modului în care această energie afectează structura - fie ea materială sau biologică - este afectată de aceasta. Astfel, mărimea operațională folosită pentru a cuantifica energia indusă de radiație în structură se numește doză și este definită ca doză, având unitatea de măsură

$$[D] = \frac{J}{kg} = Gy(Gray) \quad (3.2)$$

Cu ajutorul acesteia se definește debitul de doză ca fiind :

$$D = \frac{dH}{dt} \quad (3.3)$$

unde H reprezintă doza determinată, se măsoară în Gy/h.

$$D = -\frac{1}{\rho} \nabla \vec{G} \quad (3.4)$$

e considerată ecuația fundamentală a dozimetriei, unde \vec{G} reprezintă fluența vectorială de energie.

Atunci când mediul iradiat se află într-un câmp de radiații X sau γ fluența vectorială devine: $\vec{G} = \vec{G}_f + \vec{G}_e$ și \vec{G}_e descriu fluențele vectoriale ale fotonilor și electronilor, iar ecuația fundamentală a dozimetriei devine:

$$D = -\frac{1}{\rho} \nabla \vec{G}_f - \frac{1}{\rho} \nabla \vec{G}_e \quad (3.5)$$

3.2.1 Kerma - Energia cinetică depusă în aer

Kerma reprezintă energia cinetică eliberată în mediu pe unitatea de masă. Aceasta este definită ca energia cinetică totală a tuturor particulelor percepute eliberate de particulele fără sarcină pe unitatea de masă a materialului țintă. Matematic kerma se poate scrie ca raportul dintre energia cinetică a particulelor cu sarcină și masa materialului.

Kerma se măsoară în J/Kg sau Gray, E_{cin} este energia cinetică cedată de particulele încărcate ce au apărut ca urmare a interacțiilor produse de radiația ionizantă. Această energie nu este neapărat egală cu energia transferată de radiația incidentă deoarece o parte din energie poate merge, de asemenea, în alte procese cum ar fi procesul radiativ sau neradiative.

$$K = \frac{dE_{cin}}{dm} \quad (3.6)$$

Considerând ecuația 3.6, se poate observa că formula prezentată reprezintă forma simplificată a ecuației microscopice pentru care unitatea de volum a fost adusă la limită.

$$K_{mic} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta E_{cin}}{\rho \Delta V} \quad (3.7)$$

Kerma este o cantitate operațională specifică mediului de propagare a radiațiilor și are valori diferite pentru condiții termodinamice sau compozitii diferite ale acestuia.

$$D = K \quad (3.8)$$

reprezintă echilibrul electronic în care doza absorbită este egală cu kerma, această ecuație simplificând calculele dozelor și permitând o corelare foarte bună între iradiere

și efectele sale.

Condiția necesară ca echilibrul electronic să aibă loc este datorată atenuării fasciculului de fotoni, atenuare ce trebuie să fie neglijabilă.

3.2.2 Parcursul mediu liber și pierderea medie de energie

Parcursul mediu liber

Parcursul unei particule grele prin substanță depinde de energia, de masă și de sarcina particulei, de densitatea și de numărul Z al substanței. Atunci când particula pierde toată energia aceasta se oprește. Parcursul este definit de relația:

$$R = \rho x = \int_E^0 \frac{dE}{-\frac{dE}{dx}} \quad (3.9)$$

unde, ρ reprezintă densitatea substanței.

Parcursul masic R se măsoară în Sistemul Internațional în Kg/m^2 . Se mai utilizează și $1g/cm^2 = 10Kg/m^2$; $1mg/cm^2 = 10^{-2}kg/m^2$.

Parcursul în cazul electronilor de o anumită energie se definește ca fiind parcursul maxim, reprezentat de grosimea minimă de substanță care poate opri în totalitate electronii.

Parcursul maxim al electronilor este de fapt egal cu lungimea parcursului frânt prin substanță al acestora.

Dacă energia $E > 0,8$ MeV atunci

$$R_{max} = 0,542E - 0,133 \quad (3.10)$$

Parcursul liniar maxim al particulelor este dat de parcursul acestora în mediu până cand are loc stoparea lor completă și este reprezentat de următoarea formulă:

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{\frac{dE}{dx}|_{ion}} \quad (3.11)$$

unde E_0 este energia cinetică a particulei incidente [25].

Pierderea medie de energie

Pierderea liniară de energie reprezintă cantitatea medie de energie pe care o particulă încărcată o cedează pe unitatea de parcurs.

Pierderea de energie se datorează în principal ionizării, particulele încărcate cedând treptat energie până când energia acestor particule devine comparabilă cu energia de agitație termică a atomilor mediului.

Cedarea de energie mai poate avea loc și prin emisia unei radiații electromagnetice care este numită și radiație de frânare sau brehmsstrahlung.

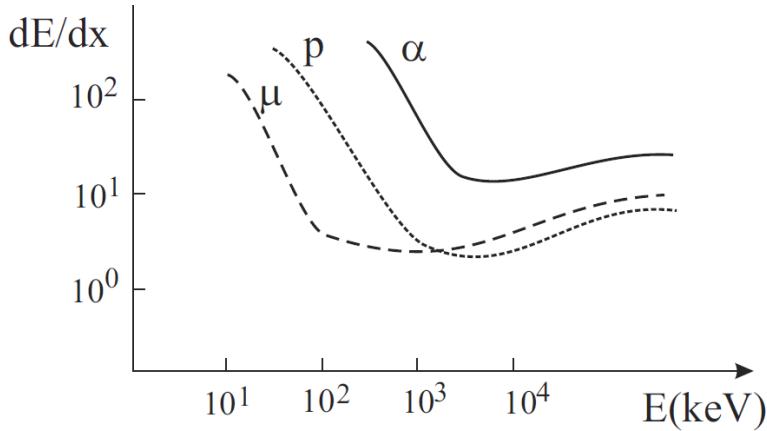


Figura 3.4: Dependența puterii de stopare de energia particulelor analizate [17].

Pierderile prin ionizare sunt importante datorită ciocnirilor columbiene electron-electron iar cele prin radiație se datorează ciocnirilor cu nucleele. Deoarece forța columbiană între electron și nucleu este proporțională cu Z , sarcina nucleului, atunci pierderile prin radiație sunt proporționale cu Z^2 , aceasta având o mare importanță practică pentru că atunci când vrem să producem radiația de frânare folosim materiale cu un Z mare, iar când ne dorim să ecranăm sursele de electroni folosim materiale cu un Z mic astfel încât pierderea de energie prin frânare să fie cât mai mică [29].

$$-\frac{dE}{dx}|_{rad} = \frac{E}{t_r} \quad (3.12)$$

Puterea de stopare se poate calcula considerându-se doar pierderile de energie prin ionizare și este definită de relația: $-\frac{dE}{dx}$.

Relația Bethe-Bloch pentru puterea de stopare:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2}{4\pi\epsilon_0^2 mv^2} n Z \left[\ln \frac{2mv^2}{w} - \beta^2 - \ln(1 - \beta^2) \right] \quad (3.13)$$

unde, e reprezintă sarcina elementară ($1,6 * 10^{-19} C$), ze reprezintă sarcina particulei, m este masa electronului, v - viteza particulei, n - numărul de atomi/ m^3 din substanță, Z - numărul atomic al substanței, w - energia medie de ionizare (energia medie consumată de particulă pentru o excitare), $\beta = v/c$. Pentru Z mai mare decât 47 w se poate calcula astfel:

$$w = 8,8Z(eV) \quad (3.14)$$

iar numărul de atomi din unitatea de volum:

$$n = \frac{\rho N_A}{A} \quad (3.15)$$

de obicei pierderea de energie se ia pe unitatea de parcurs și se exprimă în: $(eVg^{-1}cm^2)$, ρ fiind densitatea substanței.

În cazul puterii de stopare în aer pentru diverse particule, pentru energii mari puterea de stopare nu mai depinde de energie (pentru particule cu aceeași sarcină) iar pentru energii mici puterea de stopare diferă la diverse particule.

Parcursul masic maxim (PMM) se obține amplificând ecuația (3.7) cu densitatea obținându-se o nouă mărime independentă de natura absorbantului și care depinde doar de energia particulei incidente.

O relație de scalare ce leagă parcursurile a două particule dar în două medii diferite este:

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{\rho_a}{\rho_b} \frac{\sqrt{A_a}}{\sqrt{A_b}} \quad (3.16)$$

unde A_a și A_b reprezintă numerele de masă iar ρ_a și ρ_b reprezintă densitățile.

3.2.3 Cantități operaționale în dozimetrie

Atunci când vorbim de transportul radiației sau modul în care aceasta se propagă prin mediile pe care le întâlnește au fost definiți doi coeficienți specifici fiecărui material, unul nedependent de natura acestuia și cel de-al doilea legat de interacția exclusivă cu materia vie.

Transferul liniar de energie

Transferul Liniar de energie notată prescurtat TLE, este o mărime definită de Comisia Internațională de Radioprotecție (ICRU) și este egală cu:

$$L = \frac{dE_L}{dx}, \quad (3.17)$$

unde dE_L reprezintă capacitatea de energie transferată local mediului. Transferul liniar de energie este deosebit de important deoarece cu cât cantitatea de energie transferată local este mult mai mare cu atât efectele iradierii sunt mai mari și distructive.

Această cantitate este caracterizată de o puternică dependență atât de natura radiației incidente. În tabelul 3.1 sunt prezentate o serie de valori ale *Transferului Liniar de Energie* pentru diferite energii ale celor mai comune tipuri de radiație.

Tabelul 3.1: Transferul liniar de energie pentru cele mai comune tipuri de radiație [25]

Radiație	Energie [MeV]	TLE [keV/m ⁻³]
Fotoni Gamma	1,332	0,23
Fotoni X	22,00	0,19
Fotoni X	0,20	1,70
Fotoni X	0,05	6,30
Radiația β	<18 KeV	4,70
Electroni	20,00	0,20
Radiație α	5,30	43,00

Răspunsul biologic la doză

Deoarece particulele grele (încărcate) împreună cu neutronii pot produce reculuri ale ionilor atunci are loc un efect distructiv al țesutului, mult mai mare decât al fotonilor gama, pentru aceeași doză absorbită și atunci s-a corelat acest efect biologic cu transferul liniar de energie.

Eficacitatea biologică relativă este o mărime ce caracterizează raportul dintre doza absorbită de la radiația etalon și doza absorbită de la radiația considerată.

$$EBR = \frac{D_0}{D} \quad (3.18)$$

Eficacitatea biologică relativă în cazul radiațiilor X, γ și electroni $\eta=1$, pentru neutroni termici $\eta=5$, pentru neutroni rapizi și protoni $\eta=10$, iar pentru particule α $\eta=20$.

Doza echivalentă în sistemul internațional (S.I) pentru a putea fi diferențiată de doza absorbită este exprimată în Sievert, 1 Sv fiind egal cu energia de 1 J și absorbită de o masă de 1 Kg.

Factorul de pondere (W_r) și factorul de pondere tisulară (W_t)

Tabelul 3.2: Valori numerice ale factorilor de pondere tisulari [19]

Organul sau țesutul	w_T	Organul sau țesutul	w_T
Gonade	0,20	Ficat	0,05
Măduvă osoasă hematopoietica	0,12	Esofag sau vezică urinară	0,05
Colon	0,12	Glanda Tiroidă	0,05
Plămân	0,12	Piele	0,01
Stomac	0,12	Suprafață osoasă	0,01
Sâni	0,05	Restul organelor și țesuturilor	0,05

Primul factor(W_r) este folosit în determinarea dozei echivalente, acesta fiind înmulțit cu doza absorbită din câmpul de radiație, iar al doilea factor (W_t) reprezintă raportul dintre doza echivalentă efectivă și doza echivalentă și este folosit în calculul dozei echivalente efective.

3.2.4 Expunerea la radiație

Expunerea la radiație poate fi externă sau internă, expunerea externă având loc atunci când sursele de radiații se situează înapara (în exteriorul) corpului iar expunerea la radiații internă are loc atunci când sursele radioactive se află în interiorul corpului.

Atunci când în exteriorul unui corp este plasată o sursă externă de radiații (X sau γ) având o grosime de ordinul decimetrilor această sursă va transfera energie pe

tot volumul iradiat, iar atunci când o sursă de radiații (α sau β) se situează tot în exteriorul unui corp va transfera toată energia doar unui strat superficial, având o grosime de maxim 1,3 centimetri, în general aceasta este absorbită în țesutul adipos al corpului și ceea ce este foarte important de menționat este faptul că nu sunt afectate organele vitale.

În cazul protejării expușilor profesional și al populației din România sunt valabile NSR 01, limita dozei efective pentru populație conform NSR 01 este de 1 mSv/an iar cu respectarea condițiilor prevăzute la art.25 pentru populație avem următoarele limite de doză echivalentă: 15 mSv/an pentru cristalin și 50 mSv/an pentru piele, dar limita se aplică pentru valoarea medie a dozei pe $1cm^2$, pe zona pielii cea mai puternic iradiată; iar în cazul expușilor profesional limita dozei efective este de 20 mSv/an (sunt valabile și următoarele: 150 mSv/an pentru cristalin, 500 mSv/an pentru piele, limita aplicându-se pentru valoarea medie a dozei pe $1cm^2$ pe zona cea mai puternic iradiată, 500 mSv/an pentru extremitățile mâinilor și picioarelor). [19]

3.2.5 Doza echivalentă - Efectele biologice ale interacției radiației cu materia

Doza absorbită (D) reprezintă absorbția de către organism (a unei energii) expus la radiații ionizante și măsoară cantitatea de energie disipată de radiație într-o unitate de masă (de țesut). Unitatea de măsură în sistemul internațional este Gray (Gy), unde $1Gy = 1 \frac{J}{Kg}$.

Doza echivalentă se măsoară în sistemul internațional în Sievert (Sv) și se obține din produsul dozei debit cu un factor de calitate (q), factor ce are valoarea 1 pentru radiațiile X și γ și mai mare decât 1 pentru ioni și neutroni.

Aceste două doze, absorbită și debit sunt mărimi ce sunt utilizate direct în fascicule gama și de electroni.

Efectul biologic al radiațiilor depinde de doza absorbită în primul rând și de timpul iradierii acestora.

Primul efect constatat de cercetători a fost modificarea moleculei de ADN și în timp aceasta fiind supusă la diferite iradieri suferă scindări și recombinări diferite. Răspunsul biologic la doză este definit prin timpul de expunere dat (începând de la câteva secunde până la câteva zile, ani sau chiar întreaga viață) și o cale de expunere (orală, respiratorie sau cutanată).

Din diferite studii s-a ajuns la concluzia că efectele biologice ale radiațiilor pot fi dezastruoase în medii extreme de radiații cum ar fi explozii atomice sau accidente de reactoare nucleare.

Doza limită este reprezentată de valoarea dozei efective sau a dozei echivalente efective ce nu poate fi depășită raportată la o persoană.

Deci putem vorbi de două tipuri de efecte: efecte deterministe și efecte stocas-

tice. Efectele deterministe ne prezintă pierderea funcției tisulare rezultate în urma iradierii organismului cu radiații ionizante peste o anumită doză, doză ce mai e denumită și prag, iar agresivitatea efectelor o distingem odată cu creșterea dozei. Efectele stocastice sunt de fapt efecte ce apar în urma expunerii la radiații ionizante, fie ca este sau nu depășit pragul de doză, și, se referă la efectele detectabile epidemiologic (maligne și ereditare). Ca și exemple de efecte deterministe amintesc: cataractă, modificări hormonale (sterilitate), modificări cutanate, insuficiență renală și.a. În legătură cu efectele stocastice, acestea pot apărea și la doze foarte mici, neexistând doză-prag.

3.3 Dozimetria radiațiilor

Domeniul detecției și dozimetriei radiațiilor este reprezentat de dozimetria individuală, retrospectivă, clinică și de mediu în care se folosește aparatură specifică de cea mai bună calitate și astfel se obțin și rezultate pe măsură, ocupându-se cu estimarea cantitativă a gradului de iradiere a substanței.

Cea mai des folosită aparatură o reprezintă sistemul dozimetric cu cititor TLD, atât la noi în țară cât și în diverse țări europene.

Dozimetria individuală e folosită în evaluarea dozelor înregistrate de personalul profesional expus la radiații ionizante în care sistemul dozimetric cu cititor TLD față de sistemul dozimetric cu film este mult mai performant (de exemplu poate măsura doze mici, dacă în cazul filmului dozimetric care măsoară dozele datorate fotonilor cu energii între 35KeV-1,5MeV detectorii termoluminiscenti pot utiliza în cazul fotonilor cu energia > 1KeV și a neutronilor sau beta cu energia > 70KeV).

Dozimetria retrospectivă se realizează în scopul furnizării informațiilor dozimetrice pentru analizarea unui eveniment radiologic din trecut și oferirea de informații suplimentare pentru evaluarea efectelor sănătății determinată de expunerea profesională la radiații ionizante.

Metodele existente la ora actuală ne permit estimarea și măsurarea unor nivele reduse de activități și doze iar cele mai folosite tehnici sunt tehnici luminiscente (ale cristalelor și mineralelor care se găsesc în diverse materiale ceramice).

În dozimetria clinică și de mediu se folosesc diverse tipuri de fosfori (LiF , CaF_2 , Al_2O_3) în funcție de aplicația necesară, estimându-se dozele înregistrate de pacienți aflați în radioterapie și studiindu-se dependența de energia de iradiere, regresia semnalului termoluminiscent, măsurarea dozelor mici și foarte mici și.a.

3.3.1 Probleme specifice în dozimetria radiațiilor

Dozimetria Radonului

Evaluarea efectelor biologice asociate expunerii la Radon, presupune asocierea activității detectate cu energia depusă în organismele vii expuse la aceasta. Aceste efecte depind foarte mult de modalitatea de transfer al gazelor la nivelul tractului respirator.

La această dată sunt deschise direcții de cercetare [32] pentru evaluarea acestor riscuri.

Doza asociată expunerilor la radon sunt asociate conform [9] cu ajutorul unui coeficient de conversie la doză (denumit DCF). Pentru evaluarea acestui coeficient trebuie evaluată energia potențială Alfa echivalentă (PAEC - Potential Alpha Particle Concentration) cu unitatea $\frac{J}{m^3}$ pentru condițiile de concentrații la echilibru determinate (EEC) experimental (măsurate în $\frac{Bq}{m^3}$). Determinarea PAEC este realizată printr-o combinație liniară a energiilor ^{222}Rn și a descendenților acestuia având valoarea pentru $1m^3$ de $PAEC_{^{222}Rn} = 2.08 \times 10^{-5} J$ [9].

În funcție de radionuclidul înregistrat, se definește Working Level-ul (WL) sau concentrația de produși de dezintegrare asociată unei concentrații determinate pentru $1m^3$ de aer.

$$1 \frac{Bq}{m^3}(^{222}Rn) = 5.56 \times 10^{-6} \frac{mJ}{m^3} = 0.27mWL \quad (3.19)$$

$$1 \frac{Bq}{m^3}(^{222}Rn) = 7.6 \times 10^{-5} \frac{mJ}{m^3} = 3.64mWL \quad (3.20)$$

Folosind aceste cantități, evaluarea riscului asociat expunerii la concentrația de radon Rn ¹ detectată folosind coeficienții propuși de UNESCEAR [9] - cu mențiunea că acești coeficienți sunt utilizati în evaluarea riscului asociat expunerilor profesionale.

Notăția WLM este Working Level Month și reprezintă concentrația asociată unei luni de expunere:

$$H_p(10) = PAEC \times 1.430 \frac{Svm^3}{jh} = 5.06 \frac{Svm^3}{WLM} = 7.95 \frac{nSvm^3}{Bqh} \quad (3.21)$$

prin rotunjirea acestui coeficient de conversie la doză de $7.95 \frac{nSvm^3}{Bqh}$ la $8 \frac{nSvm^3}{Bqh}$ constatăm o bună concordanță cu coeficienții propuși de ICRP [41, 47]. Un aspect important îl reprezintă factorul de ocupare sau timpul în care subiectul este expus concentrației de radon determinate, acesta fiind în permanență o fracție din timpul total.

¹Cu ajutorul acestei notății indică ambii radionuclizi, ^{222}Rn și ^{220}Rn

3.4 Principii de detecție

Energia depusă direct, prin retroîmprăștiere (albedo), energia de ionizare pentru detectorii activi. Dozimetrele de albedo sunt folosite în general în dozimetria de neutroni, sunt formate din: casetă și o caseta ce este compusă din patru detectori, doi dintre ei fiind din $^7LiF : Mg, Tl$

3.4.1 Mărimi evaluate

Doza ($H_p(10)$, $H_p(03)$, $H_p(07)$), doza ambientală (H^*), kerma, fluentă, distribuția energetică a particulelor. Mărimile operaționale se clasifică în funcție de tipul de expunere, atunci când avem expunere externă este utilizat echivalentul de doză ambiental și direcțional $H^*(10)$ și $H(0.07)\Omega$ pentru monitorizarea ariei, iar pentru monitorizarea individuală se folosesc echivalentele de doză personale (H_{p10} și $H_{p0.07}$); atunci când avem expunere internă doza efectivă este calculată folosind coeficienții de doză de referință, din încorporarea radionuclizilor prin ingestie sau inhalare (Sv/Bq).**[ICRP2007]**

$H^*(10)$ reprezintă echivalentul de doză și este echivalentul de doză H, care, conform ICRU este produs de câmpul expandat și aliniat corespunzător la o adâncime de 10mm pe raza vectoare opusă sensului câmpului aliniat **[ICRU 2001]**, $H = D \times Q$, unde D este doza absorbită la punctul de interes din țesut, Q reprezintă factorul de calitate corespunzător, valoarea fiind determinată de tipul și energia particulelor ce trec printr-un element de volum mic la acest punct. Unitatea de măsură pentru echivalentul de doză ambientală este [J/Kg] numită Sievert.

3.4.2 Optimizarea răspunsului detectorilor

Corecția parametrilor detectorilor pentru geometrii cunoscute prin modelarea transportului radiației.

Atunci când discutăm de optimizarea răspunsului detectorilor facem referire la eficacitatea unui detector de radiații, rezoluție energetică și corecții de coincidență. O sursă punctiformă care emite fotoni monoenergetici în unitatea de timp și care este situată la distanța d față de un detector cilindric de raza R și înălțime H iar un număr de fotoni ce se îndreaptă spre detector în unitatea de timp intră în detector, putem observa că nu toți fotonii intrați în detector interacționează, ci doar o fractiune (ϵ_t), atunci vorbim de eficacitate totală de detectie.

$$N_1 = N_0 \frac{\Delta\Omega}{4\pi} = N_0 \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}}\right) \quad (3.22)$$

Fotonii pot interacționa fotoelectric la energii mai mici sau egal cu 1 MeV iar probabilitatea de a interacționa la traversarea stratului de grosime al detectorului (dx) este $\mu_f(E)dx$, semnalul detectorului corespunzând energiei E; sau fotonii mai pot interacționa Compton, în acest caz semnalele detectorului aparținând unui interval larg, ele fiind necorelate direct cu energia, se grupează în aşa numitul pic de absorbție totală.

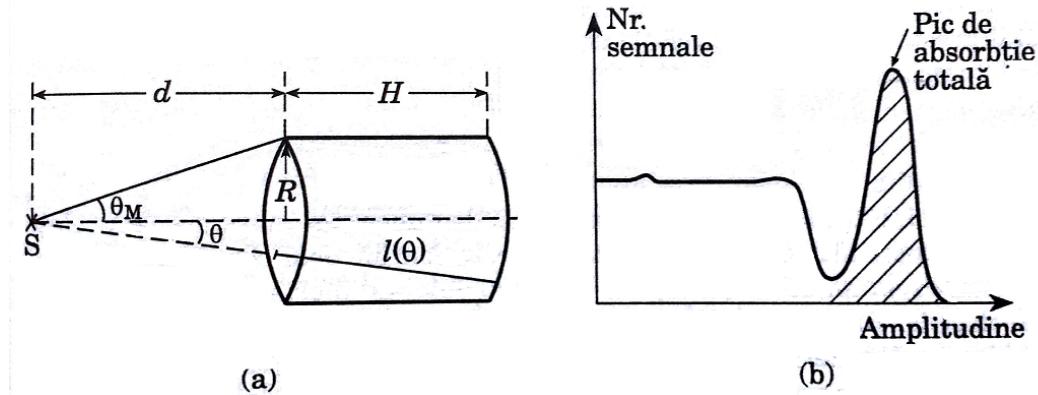


Figura 3.5: Geometria sursa detector (a) si forma spectrului de radiatii gamma (b)[46]

3.5 Detectori de radiație

Detectorii de radiații nucleare sunt acele sisteme care pun în evidență existența radiațiilor nucleare permitând determinarea calitativă sau cantitativă a unor dintră caracteristicile lor (numărul de particule nucleare, energia, masa particulelor, etc.)

Detectorul de radiații nucleare realizează conversia particulelor incidente pe suprafața sa activă în semnal electric (sarcină sau tensiune) sub formă de impulsuri.

Detectorul de radiații este compus din două părți:

- corpul de detecție propriu-zis, ce constă dintr-un mediu în care radiația nucleară produce un efect specific
- sistemul de înregistrare a efectului produs de particula ce asigură amplificarea și prelucrarea semnalului obținut

Interacția radiațiilor nucleare cu materialul detectorului este dată de energia implicată în procesul de interacție și este mai mare decât energia de legătură a electronilor din atom putând genera schimbări sau transformări în structura atomilor componenți ai substanței.

- mecanismele ce stau la baza interacției radiațiilor nucleare cu materia sunt ionizarea și emisia/conversia luminii
- particulele încărcate produc: ionizare și scintilații, iar particulele care nu au sarcină electrică sunt detectate indirect prin intermediul particulelor încărcate pe care le produc în materialul detectorului (de exemplu:
 - fotonii produc electroni (prin efect fotoelectric extern sau efect Compton) care la rândul lor produc ionizare
 - neutronii produc reacții nucleare în care apar particule încărcate ce produc ionizare)

Clasificarea detectorilor de radiații nucleare:

Dupa mecanismul de interacție:

1. Înregistrarea proceselor de ionizare în zona activă a detectorului

Mediu activ gazos sunt cei mai comuni detectori ce folosesc pentru volumul sensibil materialele aflate în stare gazoasă, la diferenți parametrii termodinamici (cel mai des sunt modificate presiunile) și în care au loc procesele de ionizare. Pentru astfel de detectori se folosesc de regulă gaze nobile în special datorită stabilității chimice ridicate a acestora dar și hidrocarburi datorită numărului mare de nucleii de Hidrogen ce pot fi folosiți la termalizarea neutronilor până la energiile la care secțiunea eficace de captură este suficient de mare pentru a favoriza detecția;

Mediu activ solid sunt detectorii cu semiconductori ca cei formați din Siliciu sau Germaniu cu sau fără impurificări;

Camera cu bule unul dintre cei mai vechi detectori, camera cu bule folosește hidrogenul lichid pentru evidențierea proceselor de ionizare;

2. Emisia, conversia și contorizarea cuantelor de lumină:

Scintilatori sunt detectorii care folosesc procesul de scintilație pentru a converti radiația incidentă în fotoni emiși pe o lungime de undă specifică sistemului de numărare;

Fotomultiplicatori sunt sisteme complexe ce permit scăderea limitei inferioare de detecție a fotonilor prin integrarea unui sistem de dinode ce acționează ca un amplificator de lumină;

Detectorii Cherenkov sunt detectorii ce înregistrează efectul Cerenkov în materiale de densități ridicate - materiale gazoase, lichide sau plastice;

Parametrii unui detector de radiație sunt: sensibilitatea, rezoluția energetică, funcția de răspuns, eficiența, timpul de răspuns și timpul mort.

Sensibilitatea unui detector reprezintă numărul minim de cuante (sau particule) detectate pentru un anumit câmp de radiație, mai exact capacitatea detectorului de a detecta și de a măsura radiațiile care ne interesează, detecția fiind realizată în prezența zgromotelor și a semnalelor cauzate de alte radiații.

Rezoluția energetică reprezintă precizia cu care detectorul poate măsura energia radiației și capacitatea acestuia de a distinge diferite tipuri de radiații observate, pentru un fascicul monoenergetic dat.

Detectorul cu scintilații. Fotomultiplicatorul

Fenomenul pe care se bazează funcționarea acestor detectori constă în apariția de scintilații în cristale anorganice sau substanțe organice.

La baza construcției unui scintilator stă fenomenul de fluorescență, care constă în schimbul de energie dintre particulele nucleare și materialul scintilatorului. Lumina

produsă de scintilator este transportată la fotomultiplicator, care este un instrument ce transformă un semnal luminos într-un semnal electric.

Fotomultiplicatorul este construit dintr-un tub de sticlă vidat în care se află: un fotocatod, un ansamblu de dinode, un divizor de tensiune și un anod.

Fotonii care apar în scintilator (scintilațiile) cad pe fotocatod, care transformă fotonii în electroni (numiți și “photoelectroni”) prin efect fotoelectric. Între fotomultiplicator și prima dinodă, între dinode și între ultima dinoda și anod se aplică diferențe de potențial, cu ajutorul unui divizor de tensiune. Aceste valori cresc, între 900 V și 2500 V (volti). Fotonii sunt accelerati (sub acțiunea câmpului electric) spre prima dinodă de unde extrag prin emisie secundară mai mulți electroni care sunt accelerati spre următoarea dinodă, unde produc din nou emisie secundară de electroni și procesul se repetă.

Dinodele au rolul de a multiplifica curentul produs de fotonii inițiali pe fotocatod (scintilațiile). Amplitudinea pulsului de tensiune ce e obținută cu ajutorul fotomultiplicatorului este proporțională cu numărul de scintilații produse de particula încărcată la trecerea prin cristal (cu energia acesteia).

Detectorul cu scintilație se folosește la numărarea radiațiilor nucleare dar și la măsurarea energiei acestora.

3.5.1 Camera de ionizare

Camera de ionizare reprezinta o incintă închisă, având formă cilindrică, formată din doi electrozi plan – paraleli și un gaz aflat în condiții normale. Cei doi electrozi formează un condensator plan, cu electrozii aflați la o distanță de 3 – 6 cm unul de altul. Atunci când acesta este străbătut de radiația ionizantă în interior camerei se vor forma pereschi de electroni-ioni care sunt colectați pe anod sub formă de curent electric [19]. Aceste impulsuri sunt ulterior analizate de electronica detectorului pentru a discrimina tipul de radiație și energia acesteia. Cea mai simplă aplicație este transformarea acestor impulsuri într-un semnal auditiv pe un difuzor - de altfel această construcție a dus la binecunoscutul semnal dat de contoarele Geiger-Müller atunci când sunt plasate în câmp de radiație.

Se poate observa faptul că pulsurile corectate sunt relativ mici și pentru a le procesa corect se impun anumite restricții în ceea ce privește blocul de amplificare al acestora (deseori fiind necesară interpunerea unui amplificator ca și corector de impedanță pentru a nu distorsiona semnalul recepționat de la detector în forma lui brută).

Regimul de funcționare al detectorului este dat de tensiunea aplicată asupra acestuia (între anod și catod) și în funcție de aceasta regimul poate fi de contor Geiger-Müller, Contor Proportional sau camera de ionizare.

Cel mai simplu tip de detector este contorul Geiger- Müller, el aparține categoriei

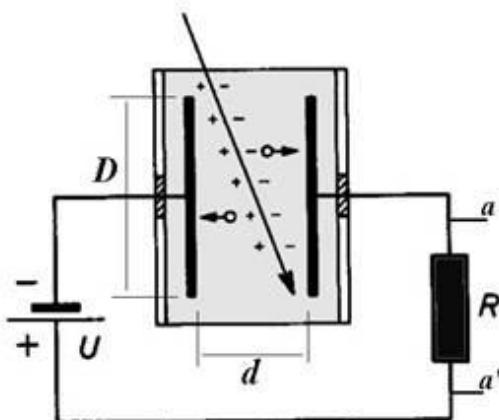


Figura 3.6: Forma constructivă generică pentru camerele de ionizare cu gaz

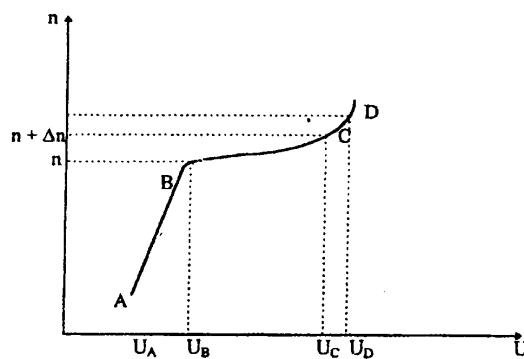


Figura 3.7: Regimul de tensiune pentru camerele de ionizare cu gaz.

de detectori cu ionizare în gaz și este caracterizat printr-un design relativ simplu. Cei doi electrozi (anodul și catodul) ce sunt introdusi într-un tub de sticlă sau de metal izolat ceramic pentru a asigura diferență de potențial necesară întregistrării actelor de ionizare. Gazul din acest tip de detectori este de regula la presiuni scăzute (zeci de torri ².

Electrozii au geometrie cilindrică, anodul fiind un fir metalic, subțire, dispus pe axul unui cilindru ce constituie catodul. Catodul poate fi un strat conductor depus pe peretele interior al tubului de sticlă, iar dacă tubul exterior este metalic, poate fi el drept catod.

Între cei doi electrozi se aplică o diferență de potențial, iar în regiunea din jurul firului central se obține un câmp electric intens, în care electronii sunt accelerati puternic iar în deplasarea lor spre anod produc ionizări în avalansă.

Prin caracteristica unui detector Geiger-Müller înțelegem graficul care exprimă dependența vitezei de numărare "n" a detectorului de tensiune, aplicată acestuia, în condițiile unui flux constant de particule, ajunse la detector (viteza de numărare se

²1 torr = 133.32Pa respectiv $1,32 \times 10^{-3}$ Atm)

notează cu ”n” și avem impulsuri pe minut).

Orice detector Geiger-Müller poate fi caracterizat prin aşa zisă pantă a palierului (palier în care amplitudinea impulsurilor produse de detector este aceeași), se exprimă în procente de variație relativă a vitezei de numărare la o sută de volți de palier. Panta detectorului are valori cuprinse între: (2 și 12 %)/ 100 V și palierul are o întindere de 200-300 V (vezi Figura 3.7).

Detectoarele au timpul de viață limitat, ele înregistrând doar $10^8 - 10^9$ impulsuri apoi caracteristica de numărare se alterează, palierul micșorându-se iar panta crește. Din această cauză este indicată verificarea periodică a caracteristicii de numărare.

3.5.2 Spectrometre

Spectrometrul cu NaI și HpGe sunt principalele spectrometre folosite în laboratoarele de spectroscopie nucleară ce pun în evidență distribuția energetică a radiației detectate. Din punct de vedere energetic al spectrometrului cu NaI dopat cu taliu se evidențiază ftopicul a carei suprafață este proporțională cu probabilitatea ca o cuantă gamma să-și lase întreaga energie în cristal, creștând Compton corespunzătoare împărtășirii cuantelor înapoi la 180 de grade și o zonă corespunzătoare împărtășirii Compton la unghiuri diferite, picul de retroîmpărtăiere apărând datorită interacției Compton a fotonilor în materialul ce înconjoară detectorul și înregistrării acestora în cristalul NaI(Tl) [29].

3.5.3 Clasificarea spectrometrelor și caracteristici

Spectrometrele, sunt detectori de radiație ce pot discrimina în energie cuantele depuse de radiația ionizantă în zona sensibilă. Vorbind de zonă sensibilă deoarece doar o anumită parte a acestora este folosită pentru a înregistra energia depusă de radiație iar raportul dintre aceasta și volumul total al detectorului sunt folosite pentru definirea eficacității totale a detectorului.

Caracteristici principale ale spectrometrelor

Înainte de a vorbi despre clasificarea spectrometrelor este necesară explicarea unor parametri specifici acestora.

Eficacitatea absolută Astfel, *Eficacitatea totală de detecție a spectrometrului este definită ca raportul dintre fotonii incidenti - în cazul spectrometrelor gamma așa cum sunt cele folosite în prezența lucrare - ce intră în volumul total al detectorului și fotonii efectiv numărați.*

$$\epsilon_A = \frac{N_T}{N_D} \quad (3.23)$$

unde am notat cu :

N_T numărul total de fotonii ce pătrund în volumul detectorilor;

N_D numărul fotonilor detectați de detectorul nostru;

Eficacitatea relativă Deoarece procesele de ionizare ce au loc în volumul detectorului pot fi influențate de fenomene specifice principiilor de detecție și geometrice ale detectorului, energia determinată experimental poate dифeри de energia inițială a cuantelor de radiație. Pentru cazul spectrometrelor gamma, fenomenele ce pot duce la denaturarea discriminării în energie pot fi:

Efectul Compton în interiorul volumului sensibil al detectorului duce la apariția unui fond de intensitate ridicată, fond caracterizat de un maxim la energia fotonilor ce au trecut de fenomenul de împrăștiere Compton la cel mai probabil unghi.

Efectul Compton în afara volumului sensibil al detectorului duce la apariția de linii gamma detectate la energii mult mai mici deoarece înainte ca radiația să interacționeze cu volumul sensibil, aceasta a pierdut energie;

Împrăștieri elastice Deși nu afectează în mod direct energia transportată de fotonii, apariția proceselor elastice poate duce la creșterea în importanță a fenomenelor de scăpare a electronilor. Aceste fenomene au o statistică de 5% și pot fi ușor acoperite de eroarea de măsurare;

Apariția unui pick de scăpare are loc în momentul în care cuantele gamma își lasă energia în vecinătatea marginii detectorului prin formarea de perechi electron-gol și unul dintre aceștia părăsește volumul sensibil al detectorului. Pickul specific acestui fenomen are loc la energia $E_\gamma - 511keV$;

Apariția pick-ului dublu de scăpare are loc atunci când amândoi, electronul și pozitronul părăsesc volumul sensibil al detectorului, energia pick-ului având valori apropiate de $E_\gamma - 2x511keV$.

Retroîmprăștierea este un fenomen specific detectorilor de mare densitate și este caracterizată prin înregistrarea unui singur electron de recul ce apare ca interacție a incidentei cu volumul sensibil al detectorului, radiația părăsind (prin retroîmprăștiere) volumul sensibil al detectorilor.

Calibrarea în energie a detectorilor este importantă deoarece prin aceasta se realizează asocierea unui bin energetic pentru fiecare canal în parte și o calibrare defectuoasă poate duce la rezultate invalide;

Calibrarea în eficacitate a detectorilor pentru acuratețea măsurătorilor este necesară trasarea curbei de eficacitate și calibrarea detectorilor astfel încât rezultatul acestora să fie corelat cu eficacitatea - o corelare defectuoasă poate duce la amplitudini eronate ale pick-urilor gamma.

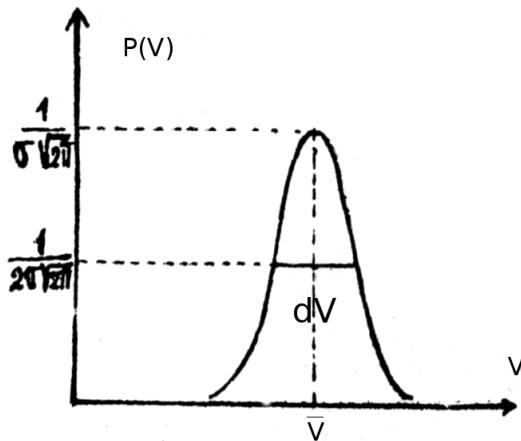


Figura 3.8: Distributia Gauss a amplitudinii pulsurilor unui detector.[29]

Eficacitatea relativă se referă la numărul fotonilor detectați pe energie emisă în raport cu numărul total de fotonii înregistrati de detector. De exemplu, pentru o sursă ce ^{137}Cs vom defini eficacitatea relativă ca fiind numărul de evenimente înregistrate la energia de 661,72 keV în raport cu integrala spectrului. De regulă, eficacitatea relativă este raportată la energia medie a fotonilor emiși de o sursă de ^{60}Co .

Rezoluție energetică Așa cum am prezentat anterior, scopul spectrometrelor este de a discrimina între energiile depuse în volumul sensibil al acestora de către radiația ionizantă cu numărarea evenimentelor pentru fiecare astfel de eveniment în parte. Astfel, ridicarea spectrului constă în ridicarea unei histograme energetice pentru intervalul de sensibilitate al spectrometrului. Una dintre caracteristicile principale ale acestuia este abilitatea de a discrimina foarte fin între aceste energii și înregistrarea rezultatelor. De regulă, rezoluția energetică pentru spectrometrele gamma este dată la energia medie a fotonilor emiși de o sursă de ^{60}Co dar uneori este importantă și zona de eficacitate mare caracterizată de energii ale fotonilor sub 120 keV unde rezultatele sunt date la energiile ^{210}Pu sau ^{59}Co . Rezoluția energetică reprezintă raportul dintre semilărgimea la semiînălțimea distribuției semnelor și amplitudinea semnalelor: Deoarece amplitudinea medie a semnalelor este aproximativ egală cu energia atunci putem scrie că:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta V}{V} = 2,36 \frac{\sigma}{V}, \text{ unde}$$

ΔV reprezintă lărgimea la semiînălțime,

σ reprezintă eroarea absolută sau abaterea standard a amplitudinii V ,

$\frac{\Delta E}{E}$ reprezintă variația energiei pe energie (variația de energie în raport cu valoarea nominală),

V , reprezintă tensiunea colectată.

Deoarece numărul de purtători (N) este reprezentat de raportul dintre energia particulei (E) și energia pierdută pentru producerea unei perechi de purtători (W), atunci obținem rezoluția energetică:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} \geq 2,36 \sqrt{\frac{N}{W}} = \frac{2,36}{\sqrt{N}} = 2,36 \sqrt{\frac{W}{E}}$$

Factorii ce conduc la o rezoluție eronată sunt zgomotul detectorului și a aparatului folosite (electronica), ca și exemplu pot aminti cazul detectorilor cu scintilatori care au o rezoluție înrăutățită datorită contribuției erorii absolute a coeficientului de conversie a fotonilor în fotoelectroni, erorii absolute a factorului de multiplicare a electronilor pe dinode, zgomotului fotomultiplicatorilor s.a.[29]

Atunci când actele de ionizare nu pot fi considerate strict independente, eroarea absolută a numărului de purtători este mai mică decât abaterea standard introducându-se în acest caz un factor de corecție, care mai este numit și factorul Fano, factor ce este reprezentat de raportul dintre dispersia experimentală a numărului de purtători (σ_e^2) și dispersia teoretică ($\sigma^2 - N$)[29]

Rezoluția temporală Rezoluția temporală reprezintă intervalul de timp minim dintre primul semnal electric și următorul semnal care poate fi înregistrat. Semnalul detectorului este prelucrat cu ajutorul unui preamplificator și amplificator fiind analizat de un discriminator, înregistrarea făcându-se cu ajutorul unui numărător.

Orice astfel de sistem are aşa zisul timp mort, în care se așteaptă următorul puls sau semnal.

De regulă, fiecare detector are un interval de timp în care ridică un puls (de regulă integrarea se realizează cu un circuit RC pe colectorul detectorului). În situațiile în care evenimentele din zona sensibilă au loc cu o rată mai mare decât intervalul de integrare poate apărea un fenomen de pile-up ce duce la saturarea colectorului de sarcină rezultând un detector paralizabil - ce nu mai poate înregistra noi pulsuri. Pentru a preveni acest fenomen, blocul electronic al detectorului ignoră al doilea puls în cazul în care acesta a survenit pe intervalul de integrare ducând astfel la apariția unui timp mort.

O altă clasă de detectori, cei neparalizabili nu prezintă fenomenul de pile-up și apariția unui nou puls în intervalul de integrare nu duce la sumarea acestora ci doar la suprapunerea temporală ducând la o diminuare a rezoluției temporale - lungimea intervalului de integrare este dublată.

Clasificarea spectrometrelor de radiații gamma

În funcție de parametrii susmenționați, spectrometrele sunt de două feluri, de eficacitate mare (spectrometrelle cu NaI) respectiv cele de rezoluție și eficacitate mare cu Germaniu.

Spectrometrelle cu NaI sunt considerate de referință, eficacitatea lor fiind una foarte mare în timp ce rezoluția energetică este foarte mică. Dacă în cazul spectrometrelor cu NaI o rezoluție pe 32 de biți (1024 de canale), pentru detectorii de Ge Hiperpur (GeHP) rezoluția energetică este pe 90 de biți (8192 de canale) pentru domenii en-

ergetice similare.

Spectrometrele cu Germaniu sunt caracterizate de o rezoluție energetică mare (1.8keV la 1332keV) și o eficacitate ridicată. Comparativ cu detectorii de NaI, eficacitatea de detecție este de 60% pentru fotonii de energia indicată. În zona energiilor joase, rezoluția energetică este mult mai mică, lățimea bin-urilor energetice fiind mult mai mică decât pentru energiile ridicate (de exemplu, ORTEC GEM60P4-83 are o eficacitate de 0,6 keV la 59 keV).

Detectorii cu Germaniu se împart și ei în două categorii, detectorii ce folosesc dopanți (de exemplu Ge:Li - Germaniu dopat cu Lituu) ce sunt caracterizați de o viteză de drift mai mare dată de dopant dat instabilitatea la variații de regim termic duce la apariția de efecte locale în difuzia dopantului ceea ce duce la semnale diferite în zone diferite a detectorului pentru aceleași cuante gamma - practic detectorul nu poate fi folosit în regim de spectrometru.

Un detector cu grad mare de stabilitate îl reprezintă cel de GeHP (Germaniu Hiper-Pur) care nu folosește dopanți dar are nevoie de un regim termic de funcționare la temperaturi foarte scăzute (-196°C) asigurate cu azot lichid sau cu răcitoare electro-mecanice dublate cu elemente Peltier.

Metode Experimentale

4.1 Aparatura utilizată

Pentru determinarea cu gradul de acuratețe cerut a cantităților dozimetrice și a spectrelor de radiație cuprinse în această lucrare a fost utilizate aparate moderne, cu capabilitățile necesare pentru obținerea rezultatelor scontate.

Un rol important l-au purtat facilitățile oferite de Centrul de Cercetare în Protecție Radiologică, centru înființat în 2009 în cadrul Catedrei de Fizică Atomică și Nucleară a Facultății de Fizică din cadrul Universității din București ca urmare a unui grant obținut prin programul CAPACITATI, contractul 62/CP/I prin care au fost înființate laboratoarele de dozimetrie generală, dozimetrie cu efect Termoluminiscent, spectrometrie gamma de înaltă rezoluție și eficacitate respectiv Centrul de Calcul Pentru Investigarea și Managementul Riscului Radiologic.

De asemenea, această lucrare se bazează și pe strânsa colaborare cu importante laboratoare de mediu care ne-au sprijinit în realizarea în bune condiții a lucrărilor cuprinse în această lucrare.

4.1.1 Cititorul Harshaw 4500 TLD

Manualul acestui aparat și operarea sistemului conține: manualul (încărcarea dozimetrului, selectarea fișierului, definirea setărilor, definirea achiziției parametrilor, introducerea identității dozimetrului, start), sistemul (aplicarea profilului de evoluție a temperaturii , asocierea luminii înregistrate cu doza depusa pe detector, înregistrarea rezultatelor, indexarea elementelor perechi). Sistemul multiplicator bazat pe două canale distincte permite ridicarea a două curbe de strălucire simultan. Se identifică fiecare cartelă cu scannerul de bare, fiecare cartelă având codul de bare individual. Citirea detectorilor de extremitati cu două, trei sau patru elemente folosind sistemului de încălzire cu gaz fierbinte. Citirea cartelelor cu patru elemente se face în secvență automată, două câte două. Interfața cu utilizatorul este asigurată de programul WinREMSTM produs de Thermo ScientificTM împreună cu algoritmi specifici pentru calculul dozelor, deconvoluția curbelor de strălucire sau dozimetrie individuală ce pot fi achiziționați adițional. Interfațarea cu cititorul TLD nu necesită utilizarea unui calculator dedicat.

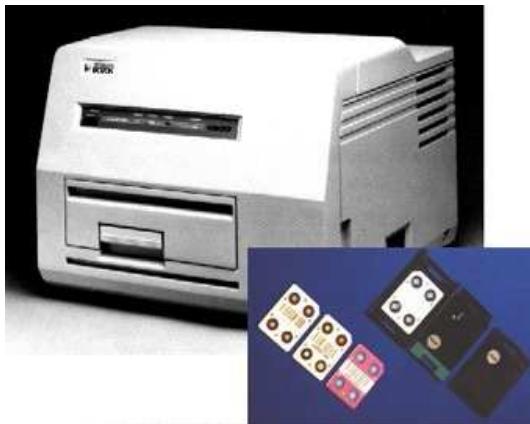


Figura 4.1: Cititor tld Harshaw 4500

Specificațiile aparaturii

Sistemul dozimetric termoluminiscent compus din aparatul Harshaw 4500 Manual Reader și detectori termoluminiscenti poate fi folosit în dozimetria individuală, retrospectivă, clinică, dozimetrie de mediu. Dozimetru termoluminiscent individual este un dozimetru integrator folosit pentru evaluarea dozelor înregistrate de personalul expus profesional la radiațiile ionizante.

Acest sistem dozimetric are o serie de avantaje față de sistemul dozimetric cu film precum: dependența slabă a răspunsului detectorului de energia la care a fost iradiat, posibilitatea măsurării unor doze mici (limita minimă de detecție fiind semnificativ redusă față de filmul dozimetric). Sistemul dozimetric cu film măsoară dozele datorate fotonilor cu energii cuprinse în intervalul 35 keV - 1,5 MeV, însă detectorii termoluminescenți pot fi utilizati pentru evaluarea dozelor în cazul: fotonilor cu energia > 1 keV cu discriminarea componentei β externe, Întregului spectru de neutroni folosind detectori de albedo speciali bazați pe reacție nucleară. β , cu energia > 70 keV (limita inferioară de doză se datorează în principal constrângerilor de ordin tehnic legate de caseta folosită). Cristalele termoluminiscente sunt în număr de două, trei sau patru pe o cartelă, putând fi estimate echivalentul de doză individual penetrant $H_p(10)$, echivalentul de doză individual superficial $H_p(0,07)$ și folosind algoritmul de calcul al dozelor poate fi estimată doza la neutroni.

- Detectorii Harshaw 8814 (dozimetrie de personal)
- Detectorii Harshaw 8806 (dozimetria de neutroni)
- Detectorii Harshaw 8855 (dozimetria de mediu cu sensibilitate ridicată)

Principii de detecție

La trecerea radiației prin substanță, substanța absoarbe o anumită cantitate de energie, ceea ce duce la schimbări și acest lucru trebuie utilizat pentru înregistrarea radiației. Măsurările β spectrometrice - deoarece dezintegrarea β este un proces de transformare a unui nucleu instabil în nucleu izobar $Z = \pm 1$ în urma emisiei

unui pozitron, electron sau captura unui electron energia degajată este cedată electronului, pozitronului și neutrinului sau antineutrinului în proporții variabile face ca spectrul să fie continuu iar energia variază între 0 și energie cinetică maximă. Izobarii rezultați în urma procesului de dezintegrare se află în stări excitate iardezexcitarea lor se poate realiza prin emisii de cuante gamma sau conversie internă.

Energia de excitație disponibilă a izobarilor este transferată, în acest proces de conversie internă, electronilor de pe orbite care sunt ejectați cu o energie notată E_e și definiți de relația: $E_e = E_X - E_B$, E_X reprezintă energia de tranziție (disponibilă) iar E_B reprezintă energia de legătură a electronului (pe orbita de unde a fost ejetat). Ca și în cazul unei măsurători alfa spectrometrice se poate efectua măsurători beta spectrometrice a unor probe de mediu, se depun probele într-un strat foarte subțire ținându-se cont și de numărul atomic al materialului suport (pentru micșorarea fenomenului de retroîmprăștiere) alegându-se un detector adecvat și plasând probadetector într-o incintă vidată. Spectrometria beta nu este folosită în mod normal la măsurarea probelor de mediu deoarece se obțin rezultate spectrometrice reale doar pentru electronii de conversie.

În cele ce urmează vă prezint fenomenul de termoluminescență.

Sub acțiunea radiației ionizante au loc ionizări și excitări ale atomilor și moleculelor, rezultând în structura materialului și mai ales în zona cristalină, defecte. Aceste defecte, reprezintă de fapt abateri de la regularitatea ideală a structurii cristaline. Defectele punctuale există în orice solid real, dar prin iradiere numărul lor crește ducând la modificarea proprietăților materialului iradiat. Din cauza acestor defecte punctuale din structura cristalină, în interiorul benzii interzise apar nivele de energie noi ce pot fi ocupate de un purtător mobil de sarcină. Aceste nivele de energie noi se numesc capcane. Câmpul coulombian al defectelor, atrage și totodată capturează în aceste capcane electroni sau goluri, provenind din benzile de conductie sau din benzile de valență, formând centre active ce joacă un rol determinant în modificarea proprietăților materialelor. Fenomenul de termoluminescență reprezintă popularea prin iradiere cu radiații ionizante a unor centre active și depopularea lor ulterior, prin încălzire, în care energia acumulată în cristal este eliberată sub formă de radiații luminoase. Energia de activare este de fapt energia radiațiilor ionizante, iar energia de stimulare reprezintă energia termică. Centrele active sunt stabile la temperatura mediului ambiant conservându-se până la încălzirea materialului. Încălzirea materialului iradiat în prealabil, emite două tipuri de radiații luminoase: unele de spectru termic, funcție de temperatură (în cadrul procesului de incandescentă) și altele datorate luminescenței, de energii superioare.

Principiul metodei este definit cu ajutorul modelului benzilor de energie. Într-o primă etapă, a iradierii, capcanele de electroni și goluri, se populează datorită purtătorilor de sarcină mobili eliberați prin ionizare. În a doua etapă, cea de încălzire, se produce depopularea capcanelor, depopulare cu emiterea fotonilor TL. Dacă ϵ este energia capcanei de electroni, măsurată ca "adâncime" față de banda de conductie, atunci, cu cât capcana este mai adâncă cu atât ea se va depopula la o temperatură mai ridicată, iar dacă temperatura crește constant în timp, capcanele



Figura 4.2: Fenomenul de termoluminiscentă[50]

se vor depopula succesiv, începând cu cele mai puțin adânci și apoi cu cele din ce în ce mai adânci. Fluxul luminos emis (în funcție de temperatură) va prezenta o serie de maxime succesive, corespunzând depopulării capcanelor de adâncimi crescânde [1].

Acea curbă a fluxului luminos trasată în funcție de timp sau temperatură se numește (glow-curve) curbă de strălucire; suprafața de sub curba de strălucire primind denumirea de sumă a luminii. De fapt, în realitate, curba de strălucire conține și radiația de spectru termic ce trebuie eliminată prin filtrare.

Eficiența detectorului

4.2 Evaluarea spectrometrică a probelor

Măsurările γ spectrometrice - pentru determinarea concentrațiilor radionuclizilor se folosește cea mai bună metodă de spectrometrie γ de mare eficacitate și rezoluție, utilizându-se detectorii de Ge(Li) și HPGe (Germaniu hiperpur). Pentru spectrometria γ se folosesc detectorii cu cristal de germaniu (Ge), deoarece puterea de stopare este mult mai mare față de cea a siliciului (Si), dar are și un dezavantaj și anume că generează un curent termic mare la temperatura camerei, obligându-ne să îi răcim la temperatura azotului lichid (-196°C) ca să poată fi în stare de funcționare.

Calibrarea

Când dicuțăm de calibrare ne referim la stabilirea parametrilor de achiziție (număr de evenimente în ROI, timpul real, rata de numărare în canal etc), conversie digitală (minim 8192 de canale), corecția timpului mort și coeficientul de temperatură al amplificării (care este mai mic sau egal cu 50 ppm - părți pe milion/ $^{\circ}\text{C}$). Factorul de amplificare poate fi ajustat cu ajutorul software-ului iar datorită sistemului de achiziție ce posedă un software dedicat pentru prelucrarea datelor spectrometrice se pot accesa prin rețea sistemul de achiziție. Astfel se pot seta parametrii de funcționare ai sistemului, se poate realiza analiza interactivă a spectrului și analiza automată a spectrelor, se poate realiza calibrarea în energie, formă și eficacitate, corecții de extragere a fondului, corecții de interferențe, evaluare MDA (Activitatea Minim Detectabilă) și incertitudine s.a.

4.3 Modelarea Transportului Radiației

Atunci când se discută de transportul radiației se referă la diverse procese care determină distribuția energetică și spațială a radiațiilor primare produse de o sursă dar, și a radiațiilor secundare ce rezultă din interacțiunile acestora, având loc la propagarea lor prin un mediu. Scopul studierii distribuțiilor este de a determina efectele produse în diferite medii de radiații prin interacțiunile care au loc.

S-au studiat numeroase aplicații ale transportului radiațiilor, dar dintre cele mai importante amintesc:

- - calculul distribuției neutronilor în reactorul nuclear, această distribuție condiționează starea reactorului precum și evoluția sa în timp;
- - calculul distribuției electronilor rezultați din interacțiunea radiațiilor γ cu țesutul; această distribuție determină efectul iradierei în terapia cu radiații;
- - studiul influenței prezenței unui mediu în vecinătatea unei surse asupra distribuției radiațiilor transmise sau reflectate; aceasta permite investigarea și controlul compoziției și proprietăților structurale ale mediului, cu multe aplicații industriale sau în stabilirea diagnosticului medical;
- - determinarea distribuției energiei cedate într-un detector de radiații; aceasta permite calculul parametrilor detectorului respectiv.

Transportul radiațiilor se bazează pe considerente fizice ce privesc bilanțul densității particulelor, iar de aici se pot deduce ecuațiile de transport, integro-diferențiale; sau direct pentru mărimele medii și pentru probabilitatea stărilor diferite ale sistemului din care se pot calcula mărimele medii, în acest caz ne putem baza pe proprietățile de ansamblu ale sistemului fizic studiat și pe fiecare element de volum.[46]

4.4 Modelarea parametrilor detectorilor

Metodele experimentale se referă în principal la utilizarea aparaturii, dar includ și modelarea detecției și extragerea parametrilor de funcționare folosind programale disponibile (GEANT, Fluka, etc.).

Metoda de simulare “Monte Carlo” a fost descoperită în 1940 de către cercetătorii americani, angajați ai laboratorului “ Los Alamos National Laboratory”, pentru simularea traiectoriei unui neutron în plutoniu sau uraniu. De-a lungul timpului, această metodă a fost dezvoltată și formată cunoșcând o varietate de interpretări. Metoda are la bază utilizarea unor variabile aleatoare folosite pentru selecția celui mai favorabil tip de proces. O aplicație directă a metodelor Monte-Carlo este determinarea eficacității totale de detecție pentru detectorii cu volum extins (detectori planari, cu germaniu hiperpur, scintilatori, camere de ionizare...). Distribuțiile de probabilitate sunt preluate din bibliotecile de date nucleare(CSIS- conține date obținute experimental- sau ENDF- conține date modelate/deterministe nevalidate teoretic)[2,3].

Metoda mai are la bază calculul soluțiilor posibile ale problemei, determinarea unui set de numere aleatoare cu ajutorul tabelelor urmând mai apoi determinarea valorilor fiecărei variabile (folosind distribuția de probabilitate), calculul valorii variabilei funcționale de performanță generându-se apoi din nou un set de numere aleatoare și facându-se calculul valorii variabilei funcționale de performanță pentru fiecare soluție posibilă. Metoda Monte Carlo reprezintă o metodă de modelare în care procesul real este înlocuit cu un proces artificial, fiind folosită foarte des în simulări computerizate din fizică și matematică, bazându-se pe aleatorism și utilizată atunci când nu se cunosc algoritmi determiniști eficienți pentru rezolvarea unei probleme [4].

Metoda Monte Carlo a fost implementată extensiv pentru rezolvarea unei game variate de probleme de natură statistică – pornind de la procese nucleare și până la domeniul economic pentru realizarea de analize de risc. Printre cele mai comune implementări ale acestei metode sunt programele GEANT [5,6], FLUKA [7], MCNP[8] pentru modelarea transportului radiației – MCRT – precum și librării pentru evaluări cantitative – Quantlib[9] sau Cristal Ball[10].

Prin MCRT se pot evalua setup-uri individuale pentru asigurarea pragurilor inferioare de activitate detectabilă precum și eficacitatea $\epsilon(E)$ absolută de detecție. Metoda Monte Carlo s-a dezvoltat și a luat o formă finală, fiind o metodă puternică în cadrul programului nuclear, vestitul proiect Manhattan, la care au contribuit matematicieni și fizicieni ca: H.Kahn, J.von Neumann, E. Fermi și alții. Iar ulterior au fost folosite în rezolvarea diferite probleme specifice legate de transportul radiațiilor, metoda directă aplicată constând din faptul că transportul radiațiilor are loc printr-o succesiune de interacțiuni individuale.[46]

4.5 Determinări Specifice

Prezenta lucrare prezintă rezultatele obținute ca urmare a mai multor campanii de măsurători dozimetrice și spectrometrice specifice fondului de radiație în diferite condiții de expunere. Astfel, au fost abordate de la problematica dozimetrică în condiții specifice până la evaluarea radiometrică a radionucliziilor naturali și artificiali prezenți în zona Mării Negre atât în sedimente cât și în probele de apă.

În cele ce urmează vom expune fiecare campanie de măsurători în parte urmând să ilustrăm specificările fiecăreia în parte. Campaniile au fost prezentate în conferințe și lucrări de specialitate realizate pe perioada doctoratului.

4.5.1 Evaluarea debitelor de doză în zona Cernavodă

Una dintre cele mai importante activități în evaluarea dozimetrică a debitelor de doză ambientale o presupune identificarea impactului radiologic furnizat de amplasamentul instalațiilor nucleare. Cea mai importantă astfel de facilitate în Romania o reprezintă Centrala Nuclear Electrică Cernavodă (CNE Cernavodă) și în cele ce urmează vom discuta valorile obținute pentru măsurători TLD efectuate în zona de

interes din vecinătatea Centralei (conform normativelor, zona de interes este de 30 km în jurul obiectivului).

Specificul Centralei Nucleare de tip CANDU [48] poate contribui la o creștere a dozei gamma naturale prin emisii radioactive în care pot fi identificați radionuclizi ca ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{129}I , ^{130}I , ^{131}I , izotopi radioactivi ai gazelor nobile precum și alte fragmente de fisiune dar în cantități mult mai scăzute decât în cazul reactoarelor din alte filiere.

Radioactivitatea gamma naturală se datorează în principal izotopului ^{40}K aflat în scoarța Pământului încă de la formarea acestuia; în România doza anuală datorată izotopilor radioactivi naturali ^{40}K și ^{14}C (produs în atmosferă de reacțiile de captură a neutronilor proveniți din radiația cosmică) și izotopilor radioactivi proveniți din dezintegrarea actinidelor din scoarța terestră este estimată la 0,8mSv/an [9].

Cantitatea acestor izotopi artificiali poate fi detectată cu precizie folosind spectrometria gamma pentru probele de apă, sol și aer prelevate din jurul Centralei. Această activitate are loc sistematic, în Laboratorul de Control Mediu al CNE și în alte laboratoare acreditate ale Institutelor specializate din România și străinătate.

Pentru a verifica acuratețea datelor utilizate, în această secțiune rezultatele au fost comparate cu sistemul de monitorizare oficial al Centralei, sistem administrat de Laboratorul de Control Mediu al CNE Cernavodă [39]. Acest laborator folosește detectori TLD produși de Panasonic, model UD 804 bazat pe materialul CuSO_4 .

Tot pentru asigurarea calității rezultatelor obținute au fost selectate două seturi de detectori care au fost iradiate metrologic la o sursă intensă cu activitatea de $14,8 * 10^{12}\text{Bq}$ bazată pe izotopul ^{137}Cs . Sursa este model SHEPHERT Model 81 [45].

Rezultatele acestei lucrări au fost susținute în 2015, în cadrul Sesiunii Anuale de Comunicări Științifice a Facultății de Fizică din Universitatea din București [2].

Date și Metode

Deoarece asigurarea calității rezultatelor reprezintă una dintre cele mai importante aspecte la momentul realizării măsurătorilor, primele date pe care le vom discuta sunt cele referitoare la iradierea de control (în condiții metrologice) pentru cele 4 loturi de detectori.

Fondul mult mai ridicat vizibil în Lotul 2 de detectori se datorează în principal motivelor logistice care au făcut ca timpul între iradiere și citire să fie unul mult mai mare decât în cazul Lotului 1.

Iradierea a fost realizată pe două loturi pentru detectorii Harshaw 8855 deoarece din considerente geometrice legate de dimensiunea detectorilor, la o iradiere nu au încăput în iradiator mai mult de 10 detectori în condițiile cerute de o astfel de

Tabelul 4.1: Iradierea de control a detectorilor Harshaw 8814 utilizați la intercomparare - LOT 1.

Detector	Utilizare	Doza [μSv]
50049	măsurare	456
50020	măsurare	457
50004	măsurare	494
50026	măsurare	505
50044	măsurare	498
50052	măsurare	476
50024	măsurare	494
50046	măsurare	502
50010	măsurare	537
50022	măsurare	448
50007	fond	39
50003	fond	37
50016	fond	39
50028	fond	32
50034	fond	38
Media	măsurare	486,70
σ	măsurare	7,85
Media	fond	37
σ	fond	1,30
Iradiere ¹		449,70 \pm 7,90

iradiere. Detectorii Panasonic UD 804, fiind mai mici, au încăput mai mulți în iradiator pentru fiecare iradiere în parte și astfel au putut fi iradiați într-un singur lot.

Odată verificată concordanța dintre detectori se pune problema evaluării distribuției de doză pentru zona de interes de 30 de km față de amplasamentul CNE Cernavodă. Pentru acest set de determinări au fost amplasați detectorii Harshaw 8855 (detectori ambientali) în stațiile de monitorizare ale Laboratorului Control Mediu de la Cernavodă și au fost expuși în condiții similare cu aceștia. Locațiile au fost reprezentate în figure 4.3.

În setul de detectori au fost incluse și locații din zona radiologică a CNE Cernavodă.

Rezultate experimentale

Prima parte a analizei rezultatelor s-a axat pe evaluare concordanței dintre cele două loturi de detectori utilizați la iradierea de control.

După cum se poate observa în tabelul 4.3, datele sunt încadrate într-un interval 1σ și mediile lor sunt în bună concordanță. Acest lucru este vizibil și în figura 4.4 unde majoritatea detectorilor contribuie la medie.

Rezultatele expunerii pentru perioada intercomparării sunt prezentate în tabelul 4.5

Tabelul 4.2: Iradierea de control a detectorilor Harshaw 8814 utilizati la intercomparare - LOT 2.

Detector	Utilizare	Doza [μSv]
50005	măsurare	631
50019	măsurare	590
50014	măsurare	612
50021	măsurare	585
50048	măsurare	573
50000	măsurare	612
50001	măsurare	588
50054	măsurare	582
50056	măsurare	616
50006	măsurare	1317
50050	fond	154
50036	fond	155
50035	fond	170
50055	fond	173
50023	fond	161
Media	măsurare	598.78
σ	măsurare	6.47
Media	fond	162.60
σ	fond	3.85
Iradiere ²		436.18 ± 7.53

unde sunt prezente atât valorile înregistrate de detectorii Panasonic cât și cele ale detectorilor Harshaw pentru fiecare locație de expunere în parte. Locațiile unde lipsesc date au avut detectorul defect sau au fost întâmpinate contaminări ale detectorilor cu materiale chimice, detectori deschiși sau detectori spartăi.

Concluzii

Ca urmare a măsurătorilor efectuate în perioada Oct 2011-Ian 2012, au fost evaluate debitele de doză ambientală pentru 35 de locații în jurul Centralei Nuclear Electrice de la Cernavodă cu ajutorul unui set de detectori pasivi, TLD specializați pentru dozimetria de mediu. Pentru a verifica acuratețea calibrării detectorilor primul pas a fost să intercomparăm rezultatele obținute cu detectorii Harshaw cu cele obținute cu detectorii Panasonic UD 804 folosiți în mod curent la monitorizarea debitelor de doză ambientală la CNE Cernavodă.

În zona controlată radiologic a CNE Cernavodă debitul de doză a fost evaluat la $72,5 \pm 2.5 \text{nSv/h}$ ceea ce se traduce printr-un debit anual de $0,63 \text{mSv/an}$. Deoarece în interiorul zonei controlate radiologic au fost amplasați doar 3 detectori Harshaw, statistica nu a fost suficientă pentru a evidenția vreo deosebire de media prezentată de detectorii Panasonic.

Tabelul 4.3: Iradierea detectorilor Panasonic UD 804.

Detector	Doza [μSv]	Detector	Doza [μSv]
Măsurare			
0000431 E1	478	0000431 E2	458
0000431 E3	443	0000432 E2	434
0000432 E3	460	0000432 E4	462
0000433 E2	461	0000433 E3	462
0000433 E4	462	0000434 E2	466
0000434 E3	455	0000434 E4	417
0000435 E2	450	0000435 E3	440
0000435 E4	444	0000436 E2	451
0000436 E3	470	0000436 E4	439
0000437 E2	476	0000437 E3	463
0000437 E4	444	0000438 E2	454
0000438 E3	447	0000438 E4	448
0000439 E2	429	0000439 E3	439
0000439 E4	436	0000440 E2	446
0000440 E3	484	0000440 E4	423
Fond			
0000443 E2	10	0000443 E3	9
0000443 E4	7	0000444 E2	15
0000444 E3	9	0000444 E4	13
0000445 E2	9	0000445 E3	11
0000445 E4	9	0000446 E2	9
0000446 E3	9	0000446 E4	8
0000441 E2	13	0000441 E3	8
0000441 E4	12		
	Media		σ
Măsurare		454,70	5,02
Fond		10,06	0,58
Iradiere ³		444.64 ± 5.05	

În exteriorul zonei controlate radiologic, au fost amplasati 32 de detectori Harshaw și Panasonic, în perechi și a fost evidențiat un debit de doză ambientală de $76,65 \pm 1,94 \text{nSv/h}$ pentru detectorii Panasonic respectiv un debit mediu de $75,37 \pm 1,22 \text{nSv/h}$ pentru detectorii Harshaw (diferența dintre ei fiind în limita de eroare - 1σ).

Rezultatele obținute au arătat deci o bună concordanță între cele două tipuri de detectori precum și o distribuție evasiliară a debitului de doză ambientală cu distanța față de obiectivul urmărit.

Se poate observa în figura 4.5 faptul că debitul de doză are o tendință de creștere odată cu depărtarea de Cernavodă fapt explicabil prin natura solului pentru zonele depărtate. Dacă în Cernavodă solul are o compozitie specifică munților Dobrogei, pentru zona Fetesti de exemplu (25 km de la CNE Cernavodă) debitul de doză

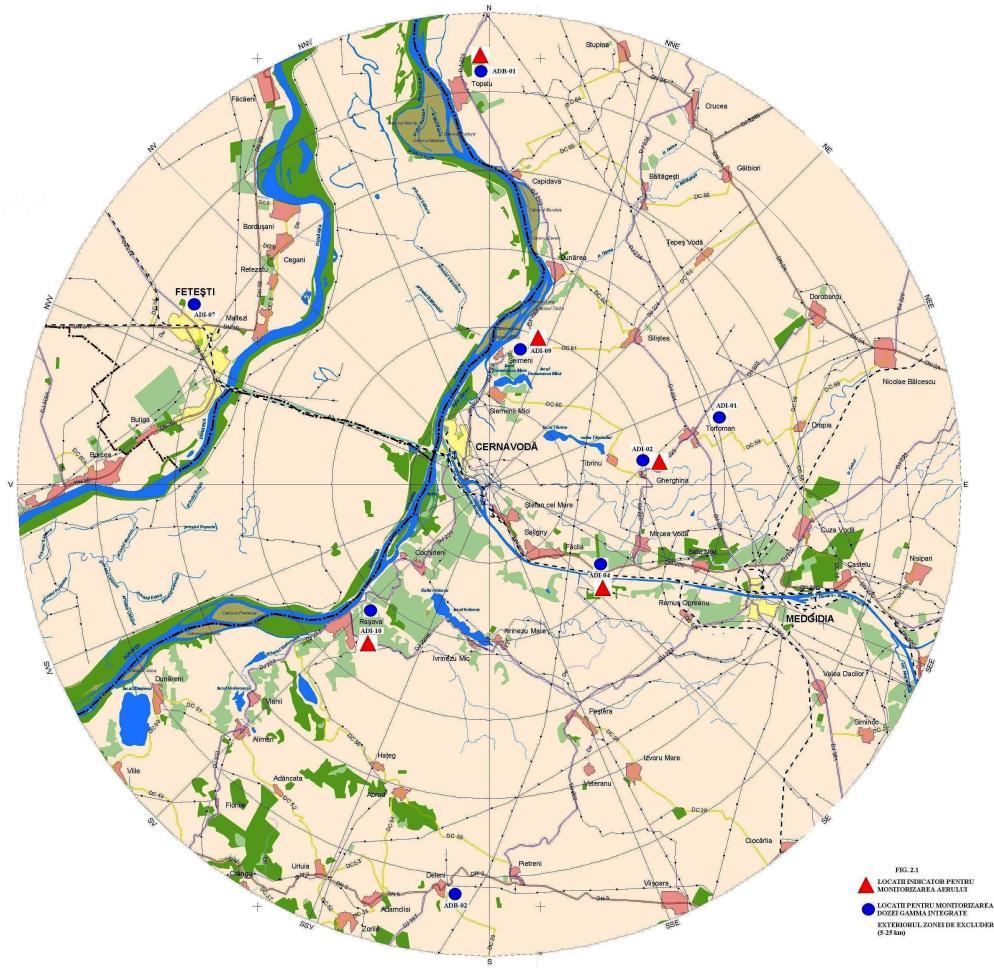


Figura 4.3: Amplasamentul stațiilor de monitorizare a debitelor de doză ambientală.

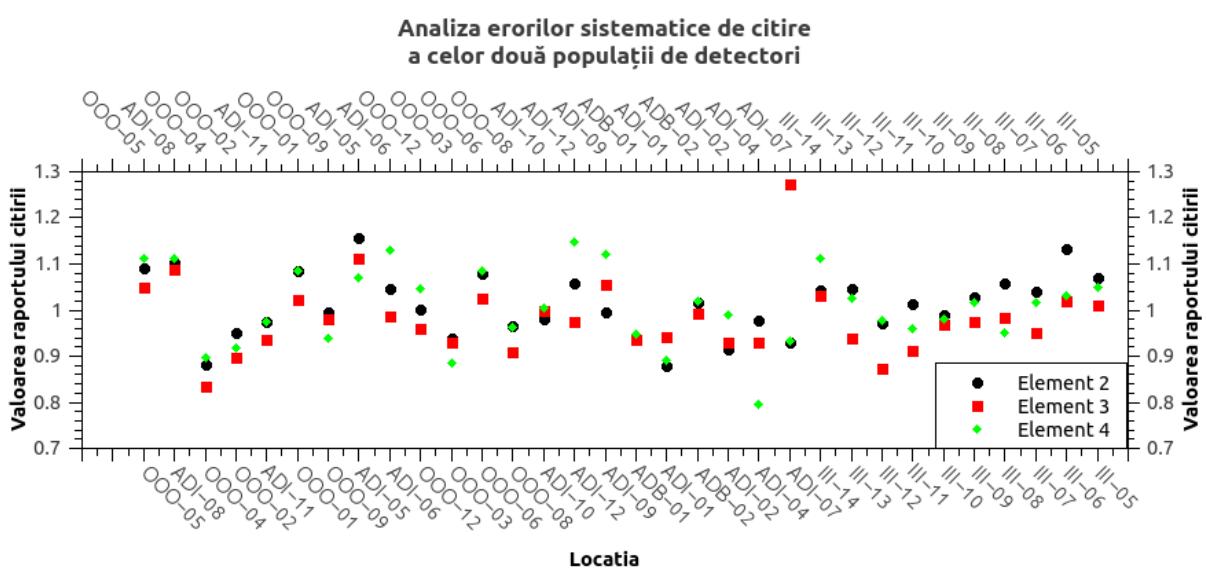


Figura 4.4: Analiza erorilor sistematice pentru determinările experimentale

Tabelul 4.4: Media debitului dozei pe loturi de detectori iradiați, Harshaw 8855 și Panasonic UD 804.

Nr	Denumire	Doza și eroarea statistică
1	Lot 1 Harshaw	449.7 +/- 7.90
2	Lot 2 Harshaw	436.18 +/- 7.53
3	Lot Panasonic	444.64 +/- 5.05

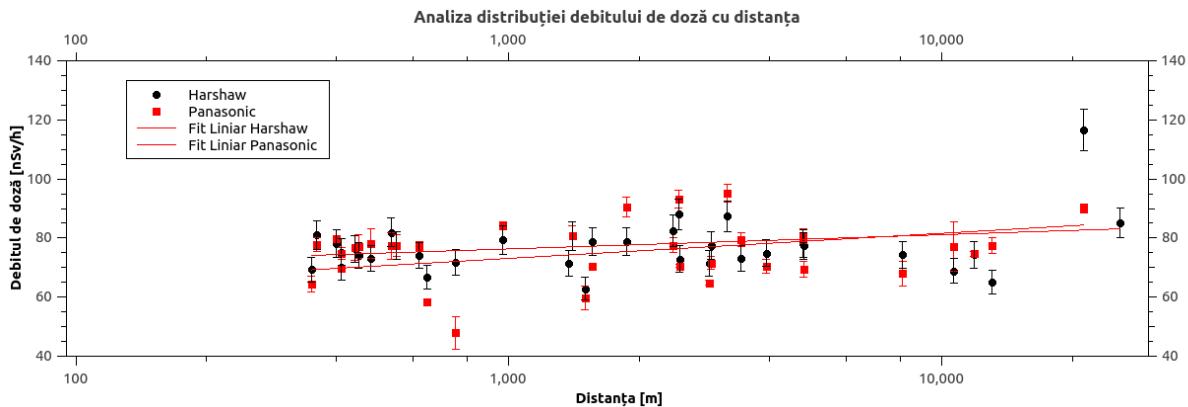


Figura 4.5: Analiza evoluției debitului de doză cu distanța de la CNE Cernavodă.

crește abrupt în special datorită faptului că zona respectivă este una agricolă, mult mai bogată în radionuclizi specifici acestui tip de activități (^{40}K , ^{226}Ra etc.). Acest comportament atipic - deoarece ne-am fi așteptat la creșterea debitului de doză conform legii pătratului distanței față de presupusul poluator - este favorabil amplasamentului Centralei deoarece un nivel scăzut al radioactivității naturale permite evidențierea mult mai rapidă a unor deversări accidentale deoarece fondul de radiație este unul scăzut.

Tabelul 4.5: Debitele de doză înregistrate în urma expunerii detectorilor pe zona de interes a CNE Cernavodă.

Cod	Distanță [m]	Panasonic [mSv]	Harshaw [mSv]
I-14	350	64.5 ± 2.6	69.4 ± 4.2
I-13	410	69.9 ± 4	70 ± 4.2
I-12	480	78 ± 5	73.2 ± 4.4
I-11	450	77.1 ± 4	74.1 ± 4.4
I-10	400	79.8 ± 1	78.1 ± 4.7
I-09	410	74.8 ± 2.1	75.2 ± 4.5
I-08	440	76.7 ± 4.1	76.4 ± 4.5
I-07	550	77.4 ± 3.7	77.5 ± 4.6
I-06	535	77.3 ± 4.4	81.9 ± 4.9
I-05	360	77.7 ± 2.3	81 ± 4.9
O-05	2928	71.6 ± 2.1	77.5 ± 4.6
ADI-08	2900	64.9 ± 0.7	71.5 ± 4.3
O-04	1866	90.4 ± 3.3	78.7 ± 4.7
O-02	3434	79.4 ± 2.3	73.2 ± 4.4
ADI-11	621	77.1 ± 1.8	74.1 ± 4.4
O-01	3932	70.5 ± 2.4	74.9 ± 4.5
O-09	4780	80.5 ± 2.5	78.1 ± 4.7
ADI-05	4800	69.4 ± 2.7	77.3 ± 4.6
O-07	1559	70.6 ± 0.7	78.7 ± 4.7
O-10	647	58.3 ± 0.7	66.8 ± 4
O-11	1374		71.5 ± 4.3
ADI-06	1500	59.7 ± 4	62.8 ± 3.8
O-12	1400	80.7 ± 3.5	80.7 ± 4.8
O-03	3194	95.2 ± 3.1	87.4 ± 5.2
O-06	2394	77.6 ± 2.4	82.55 ± 5.3
O-08	2465	93.1 ± 3.1	88 ± 5.3
ADI-10	11874	74.7 ± 0.9	74.4 ± 4.5
ADI-12	753	48 ± 5.5	71.8 ± 4.3
ADI-09	8116	68 ± 4.1	74.4 ± 4.5
ADB-01	2477	70.5 ± 0.5	72.9 ± 4.4
ADI-01	13068	77.4 ± 2.6	65.1 ± 3.9
ADI-03	25841		85.1 ± 5.1
ADB-02	968	84.3 ± 1.2	79.3 ± 4.8
ADI-04	10662	77.1 ± 8.4	68.9 ± 4.1
ADI-07	21272	90.1 ± 1.5	116.61 ± 6.94

4.5.2 Evaluarea distribuției dozelor înregistrate în depozitul de deșeuri radioactive de la Băița

Evaluarea distribuției de doză în interiorul depozitului radiologic de la Băița Bihor este o lucrare ce a presupus utilizarea detectorilor pasivi TLD pentru evaluarea debitului de doză în interiorul zonei de depozitare. Rezultatele finale au fost publicate în [34].

Evaluările realizate au presupus expunerea pentru o perioadă de 6 luni a detecto- rilor pentru fiecare tip de radiație în parte (fotoni, X și beta respectiv neutroni). Dacă în cazul radiațiilor Beta, X și Gamma rezultatele au fost concluzive, toate măsurătorile efectuate cu detectorii de neutroni Harshaw 8806 nu au putut evidenția prezența unui câmp de neutroni în zona în care au fost expuși.

Studiul vine în completarea lucrărilor anterioare [23] care au evaluat spectrometric concentrațiile de radionuclizi în același depozit dar, datorită timpului scăzut de achiziție ar fi putut să obțină rezultate incomplete în special în cazul radionuclizilor cu Activitatea Minim Detectabilă (MDA) ridicată.

Date și Metode

În timp ce studii anterioare au identificat un debit de doză de 1,16 mSv/an datorat concentrației de uraniu din interiorul depozitului respectiv un debit de doză de 1,17 mSv/an datorat în mod exclusiv Radonului și descendenților acestuia. Prezenta lucrare a căutat să realizeze o evaluare de lungă durată a acestor debite de doză cu scopul principal de a identifica eventuale discrepanțe cu valorile anterior măsurate.

Debitele de doză au fost evaluate cu detectorii Harshaw 8855 bazați pe materialul 7777H pentru evaluarea debitelor de doză aferente fotonilor și radiației beta. Detectorul TLD 7777H conține patru cristale de $^7LiF : Mg, Cu, P$ ce folosesc filtrele de Cu, Abs respectiv Pb din caseta 8855. Calibrarea detectorilor a fost realizată cu ajutorul unei surse de ^{137}Cs la un laborator metrologic folosind procedurile standard prezentate de producător [43].

În cazul detectorilor de neutroni, aceștia sunt plasați într-o casetă Harshaw 8806 și folosesc două perechi de 6Li și 7Li dintre care una plasată după o foietă de Cd pentru a compensa secțiunea eficace specifică neutronilor termici. Materialul este cunoscut sub denumirea de TLD 6776. Calibrarea detectorului a fost realizată folosind procedura standard propusă de producător prin evaluarea răspunsului relativ la o sursă de ^{137}Cs . Detectorii sunt detectori de albedo deci înregistrează neutronii retroîmprăștiati deci pentru detectie aceștia au trebuit plasați pe o fantomă SLAB de 10 cm [3]. Răspunsul acestor detectori este comparabil cu cel furnizat de detectorii activi de neutroni și au fost verificate în alte lucrări din literatură [20, 24, 1].

Campania de măsurare a fost realizată începând cu 14 Octombrie 2013 și a durat 6 luni de zile și la finalul acesteia am obținut distribuția de doză pentru zona evaluată.

La intrarea în depozit a fost amplasat un detector de neutroni pentru evaluarea fondului de radiație în afara zonei de depozitare a deșeurilor radiologice.

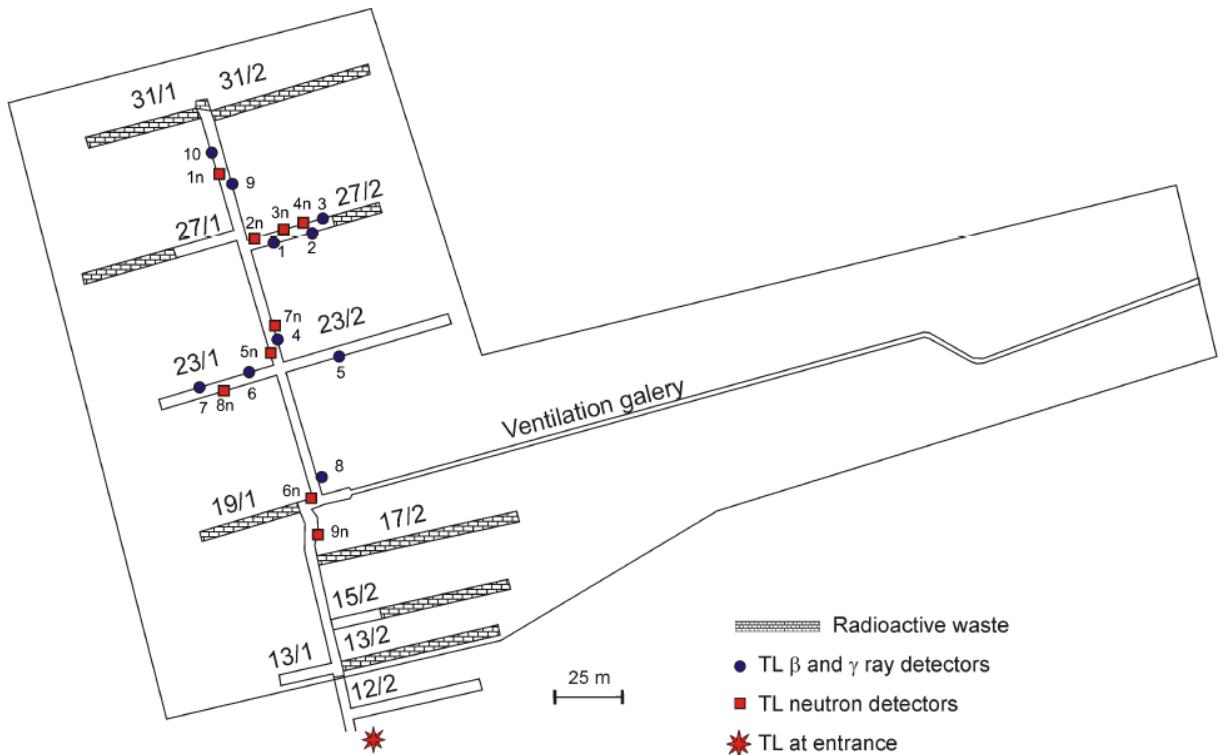


Figura 4.6: Amplasarea detectorilor TLD în interiorul depozitului radiologic. Intrarea în depozit este marcată cu o steluță iar detectorii de neutroni cu litera n. [34]

Rezultate experimentale

Răspunsul detectorilor de mediu (Harshaw 8855) permite discriminarea între dozele la cristalin - $H_p(0,07)$ - și cele de adâncime - $H_p(10)$ - precum și estimarea valorii kermei pentru zona în care detectorul a fost amplasat. Rezultatele obținute pentru detectorii plasați conform schemei prezentate în figura 4.6 sunt prezentate în tabelul 4.6 respectiv 4.7.

Spre deosebire de detectorii de mediu (ambientali), detectorii de neutroni au furnizat doar doza de adâncime - $H_p(10)$ - pentru radiația gamma respectiv pentru neutroni. Răspunsul total al detectorilor se obține prin sumarea celor două valori obținute. După cum prezentăm și anterior, nu au fost evidențiate doze la neutroni pentru detectorii folosiți și intervalul de expunere utilizat. Acest lucru de altfel este vizibil și în tabelul cu date experimentale.

Similar altor locații subterane și în cazul minei de la Băița, Bihor contribuția Radonului este una deosebit de importantă iar studii anterioare au identificat concentrații de Radon [4] ce pot atinge pe medie $475 Bq/m^3$ pentru situațiile în care sistemul de ventilație este oprit respectiv, la o oră după pornirea sistemului de ventilație se ajunge la concentrații de $60 Bq/m^3$ pentru aceeași locație. Vârful de concentrație a fost determinat în cadrul campaniei de măsurători din [4] la valoarea de $678,0 \pm 298,4 Bq/m^3$ la un interval de 14 ore de la momentul opririi sistemului de ventilație.

Tabelul 4.6: Răspunsul detectorilor ambientali (Harshaw TLD 8855 - 7777H) amplasați în depozitul radiologic de la Baița, Bihor.

Detector	H'(0,07) [mSv]	H _p (10) [mSv]	Kerma [mSv]
1	0,81	0,47	0,54
2	1,07	0,57	0,66
3	1,22	0,73	0,84
4	1,16	0,73	0,83
5	1,19	0,73	1,05
6	1,01	0,72	0,80
7	1,14	0,72	0,90
8	1,02	0,67	0,75
9	1,75	1,18	1,35
10	1,08	0,69	0,78
Media	1,18	0,75	0,88
σ	0,23	0,17	0,20

Reglementările în vigoare prevăd limite de concentrație pentru expușii profesional de $1.1 kBq/m^3$, cu mult mai mari decât concentrațiile măsurate.

Concluzii

Rezultatele obținute sunt în bună concordanță cu valorile anterior măsurate iar figura 4.7 arată că răspunsul detectorilor este consistent pentru cele două de tipuri de detectori utilizati în campania de măsurători. Debitele de doză evaluate în această campanie de 6 luni au fost de $4,43 \pm 1,94 mSv/an$.

Tabelul 4.7: Răspunsul detectorilor de neutroni (Harshaw TLD 8806 - 6776) amplasati în depozitul radilogic de la Băița, Bihor.

Detector	Gamma Hp(10) [mSv]	Neutroni Hp(10) [mSv]	Total Hp(10) [mSv]
1	1,15	0,0	0,15
2	0,91	0,0	0,91
3	0,80	0,0	0,80
4	0,81	0,0	0,81
5	0,86	0,0	0,86
6	0,80	0,0	0,80
7	0,89	0,0	0,89
8	0,78	0,0	0,78
9	0,85	0,0	0,85
10	0,64	0,0	0,64
Media	0,85	0,00	0,85
σ	0,13	0,00	0,13

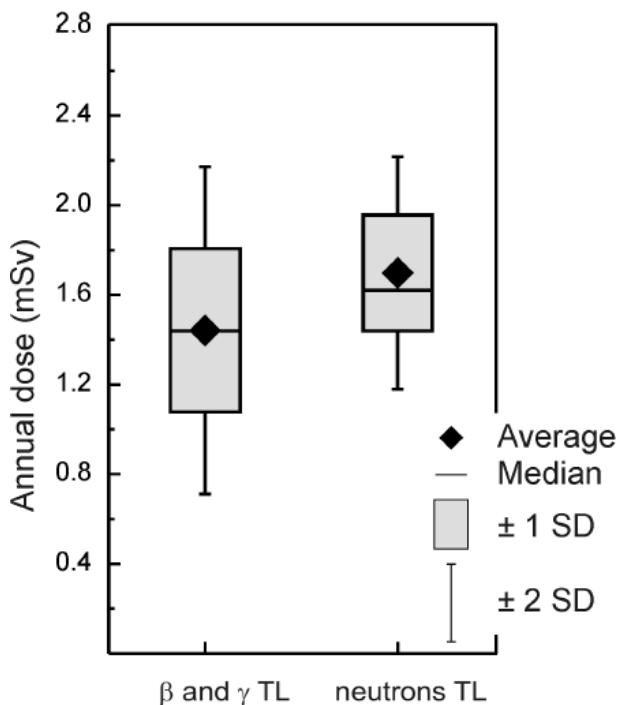


Figura 4.7: Evaluarea statistică a rezultatelor obținute pentru măsurările efectuate cu detectori TLD în interiorul depozitului de deșeuri radiologice Băița, Bihor. [34]

Pentru evaluarea impactului asupra persoanelor ce își desfășoară activitatea în cadrul Depozitului vom lua în considerare dozele beta și gamma alături de contribuția Radonului. De asemenea este necesară evaluarea riscului radiologic pentru gradul de ocupare al instalației (de regulă timpul de lucru este de 6 ore dar pentru consistență și respectând principiul ALARA) am considerat ziua normală de lucru de 8 ore ceea ce reprezintă un total de 2040 de ore pe an. De asemenea, procedura de lucru pre-

supune ca înaintea intrării în Depozit acesta să fie ventilat cel puțin 2 ore astfel încât contribuția Radonului să ajungă la minimum posibil furnizând astfel la un debit de doză de $1,14 \pm 0,6 mSv/an$ cu mult sub constrângerea de expunere a lucrătorilor expuși profesional la radiație de $20 mSv/an$ [19].

Un fenomen interesant este cel dat de răspunsul detectorilor TLD 8855 care au constructiv o energie de cutoff $E_{cut} = 50 keV$ ceea ce înseamnă că nu va determina decât o fracție din contribuția Radonului ceea ce explică debitul determinat de $1,6 \pm 0,3 mSv/an$ în timp ce valorile evaluate din literatură au fost cuprinse între $1,4 \pm 0,6 mSv/an$ pentru perioada ventilării respectiv $4,43 \pm 1,94 mSv/an$ în lipsa ventilării.

4.5.3 Evaluarea concentrațiilor de radioizotopi comuni în zona maritimă a României

Cel mai complex set de măsurători a fost cel efectuat pentru determinarea distribuției radionuclizilor în zona costieră de est a Mării Negre, pe sectorul Românesc al acesteia. Această lucrare a fost posibilă prin intermediul bunei colaborări cu Institutul de Cercetări Marine - Grigore Antipa care ne-a sprijinit logistic și operativ la prelevarea probelor de apă și sediment marin în campania Martie-Aprilie 2016.

Datorită fondului scăzut de radiație, determinarea concentrațiilor de radionuclizi de viață lungă (fragmente de fisiune) și cei din seriile naturale ale Radiului și Thoriu lui au presupus realizarea unor corecții de eficacitate și utilizarea unor timpi mari de evaluare spectrometrică a probelor. De asemenea, diferențele în densitate și masă a probelor de sediment au trebuit să fie luate în calcul la momentul efectuării corecțiilor de eficacitate și determinării timpilor de achiziție pentru ca valorile activității pentru radionuclizii urmăriți să fie bine determinate în raport cu fondul și cu MDA (Activitatea Minim Detectabilă). Un caz special a fost acela al probelor de apă unde înașa concentrăției de ^{40}K corelate în mod direct cu clorofila și alte elemente organice din apă nu au putut fi determinate decât în puține cazuri concentrații bine determinate ale radionuclizilor urmăriți și doar într-un singur caz urme al fragmentelor de fisiune specifice accidentului de la Cernobal.

Date și metode

Probele de apă și sediment au fost prelevate cu ajutorul colegilor de la Institutul de Cercetări Marine Grigore Antipa, la bordul navei "Steaua de Mare I", în luna Martie a anului 2016.

Probele au fost prelevate în sezonul cu dinamică activă în zonă (vânt, curenti, debit apă dulce - Dunăre) care influențează puternic componenta radiologică a apei de mare și a sedimentelor.

Metoda dezvoltată la bordul navei având în vedere condițiile existente a constat

în evaluarea spațiului de manevră de la momentul aducerii Van Veen-ului de la suprafața apei în cuva de evacuare pentru sediment. Timpul de prelevare de 10 secunde a fost determinat ca fiind cel necesar pentru calitatea probelor. Timpul scurs din momentul eliberării mostrei de sediment (prelevarea s-a realizat cu spatula de inox depozitată într-o cutie etanșată) a fost de 10 secunde pentru a se evita contaminarea probei cu condițiile mediului natural și antropic (vânt, prelevare probe biologice prelevate în același timp din alte samplinguri de sediment și apă). Cantitatea de sediment încapsulată în recipientul din plastic etanș (flacon) a fost aleasă cu grijă din mijlocul cantității prelevate de pe fundul mării iar apa a fost colectată în containere Marinelli (containere ce sunt închise etanș).

Prelevarea s-a efectuat cu sonda Van Veen, sondă ce este formată din două cupe actionate individual prin intermediul a câte o pârghie astfel încât să funcționeze ca un foarfec. Un sistem de blocare a acestor pârghii este activat până la momentul în care sonda ia contactul cu solul pentru ca, la ridicarea sondei, aceasta să poată preleva probă de sediment. Sistemul de prelevare folosit poate prelua o probă de pe o suprafață de 1 m^2 atunci când pârghiile sunt complet desfăcute iar greutatea sondei permite o adâncime de prelevare de până la 20 de cm din sediment.

Probele au fost păstrate timp de 28 de zile pentru a ajunge la echilibrul radioactiv al seriei naturale urmărite (seria naturală a uraniului). Concentrațiile radionuclizilor ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , și ^{40}K au fost determinate cu ajutorul sistemului spectrometric de tip n, cu germaniu hiperpur, având fereastra de carbon de 0,6 mm (tip ISOX-CALL), un analizor multicanal DSA 1000. Evaluarea probelor a fost realizată cu ajutorul unui ecran de Pb, CAMBERRA model 747.

Detectorul are o eficacitate relativă de 40 % și rezoluție de 1,98 keV pentru energia de 1332 keV caracteristică unei surse de ^{60}Co respectiv o rezoluție de 0,98 keV pentru energia de 122 keV caracteristică surselor de ^{57}Co .

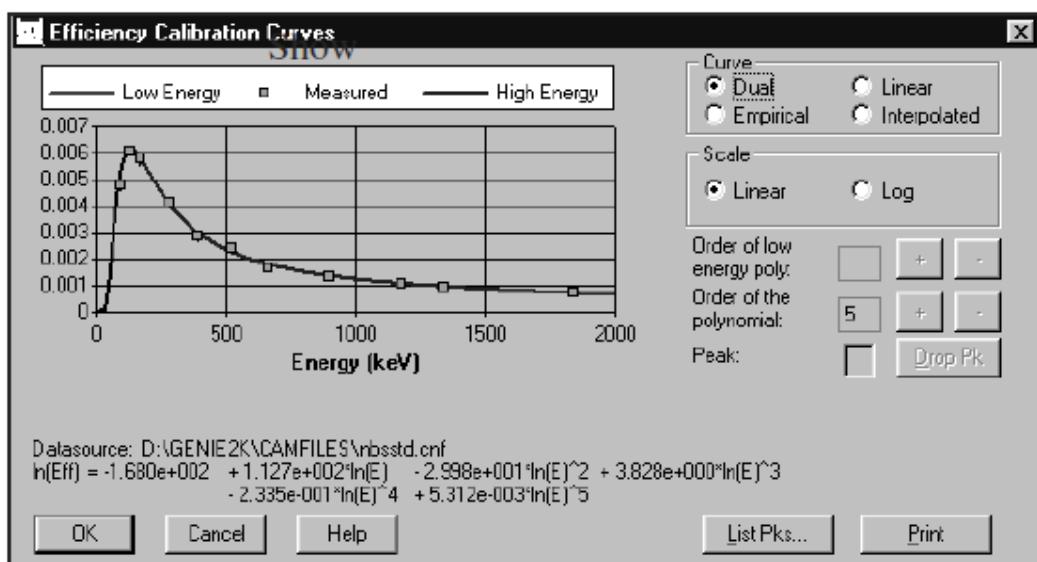


Figura 4.9: Curbă tipică de eficacitate pentru detectorii cu germaniu hiperpur($HgGe$)

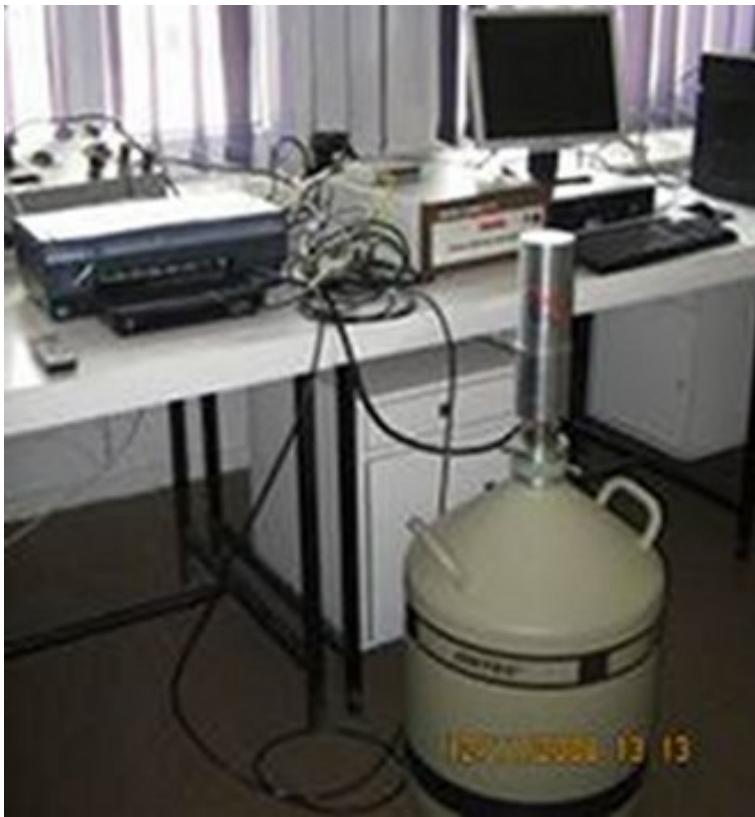


Figura 4.8: Spectrometru X și Gamma de mare eficacitate și rezoluție înainte de instalarea ecranului de Pb.

Analiza preliminară a datelor obținute a fost realizată cu ajutorul programului GENIE 2000 iar corecțiile de eficacitate au fost realizate, pentru fiecare probă în parte deoarece probele diferă semnificativ ca densitate și volum, cu ajutorul programului CANTERRA LabSOCS. Deși există produse software de referință [40], datorită sistemului de detecție utilizat și a faptului că el a venit preetalonat de producător, am folosit soluția completă pusă la dispoziție de CANTERRA. În literatură [33] au fost prezentate comparații între aceste două soluții.

Compensarea fondului a fost realizată prin intermediul a 3 achiziții de fond, fiecare a câte 200000 secunde. Informațiile privitoare la corecțiile de coincidențe au fost preluate din literatură [49]. Metoda de compensare a coincidențelor folosită este descrisă pe larg în [51].

Seria naturală a ^{232}Th a fost urmărită prin descendenții ^{228}Ac cu energii gamma de 209,25 keV, 794,95 keV, 911,20 keV respectiv 968,97 keV, ^{212}Pb cu energia de 238,63 keV, ^{212}Bi cu energia de 727,33 keV și 1620,50 keV respectiv ^{208}Tl cu energiile gamma de 583,19 respectiv 860,56 keV.

Seria naturală a ^{226}Ra a fost urmărită prin intermediul descendenților săi: ^{214}Pb cu energia 295,22 keV respectiv 1847,42 keV; ^{214}B cu energia de 609,31 keV, 768,36 keV, 934,06 keV, 1120,29 keV, 1661,28 keV, 1729,60 keV respectiv 1847,42 keV.

^{40}K are o singură linie gamma caracteristică cu energia de 1460,83 keV.

Au fost prelevate probe de apă și sedimente din Marea Neagră din 26 de stații grafice la diferite adâncimi, latitudini și longitudini, după cum urmează:

Tabelul 4.8: Amplasarea stațiilor de prelevare a probelor

Nr. Crt	Stația	Adâncime [m]	Lat. N	Long. E	Tip
1	Sulina 2	20	45,1411	29,7934	Sediment
2	Sulina 3	30	45,1228	29,9242	Sediment
3	Mila 9 1	5	45,0033	29,6517	Sediment
4	Mila 9 2	20	45,0033	29,7333	Sediment
5	Mila 9 3	30	44,9925	29,9218	Sediment
6	Sf Gheorghe 1	5	44,8836	29,6364	Sediment
7	Sf Gheorghe 2	20	44,8836	29,6783	Sediment
8	Sf Gheorghe 3	30	44,8836	29,7017	Sediment
9	Sf Gheorghe 4	40	44,8836	29,8529	Sediment
10	Portița 1	5	44,6767	29,0067	Sediment
11	Portița 2	20	44,6767	29,2992	Sediment
12	Portița 3	30	44,6767	29,4742	Sediment
13	Portița 4	50	44,6767	29,7500	Sediment
14	Portița 5	57	44,6767	29,9167	Sediment
15	Portița 6	70	44,6665	30,5246	Sediment
16	G Buhaz 1	5	44,4014	28,7672	Sediment
17	G Buhaz 2	20	44,4014	28,8433	Sediment
18	Constanta Est 1	14	44,1667	28,6833	Sediment
19	Constanta Est 2	28	44,1667	28,7833	Sediment
20	Constanta Est 3	36	44,1667	28,9000	Sediment
21	Constanta Est 4	47	44,1667	29,1333	Sediment
22	Constanta Est 5	54	44,1667	29,3667	Sediment
23	Constanta Est 6	80-90	44,1490	30,2007	Sediment
24	Constanta Est 7	90-100	44,148961	30,200745	Sediment
25	1 Delta Sud	45	44,55255	29,41115	Sediment
26	1 Dorada	90	44,39114	30,57308	Sediment

Zonele de prelevare au fost alese pentru a coincide cu locațiile standard de prelevare a probelor astfel încât, în cazul în care s-a detectat vreo anomalie, să putem asigura trasabilitatea datelor și modul în care aceste valori au variat pentru campaniile anterioare de măsurători.

În figura 4.12 este prezentată sonda Van Veen cu care au fost prelevate probele de sediment marin. Se poate observa construcția acesteia și modul de operare.



Figura 4.10: Prelevare probă de sediment ridicată de pe fundul mării negre.[27]

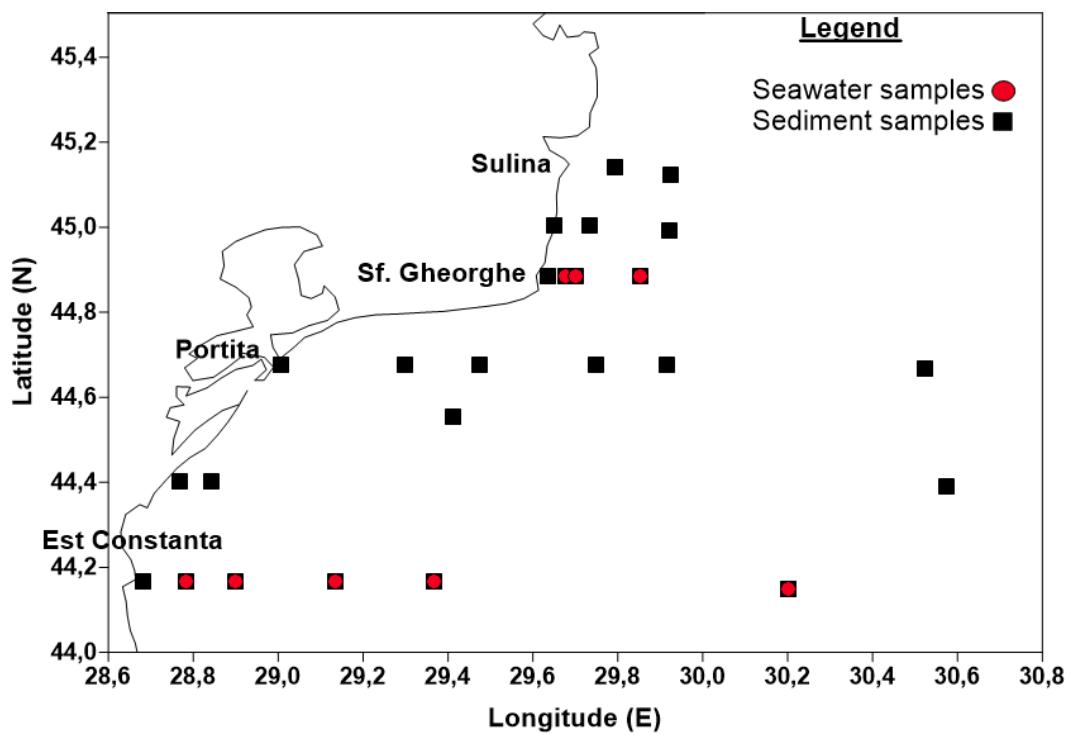


Figura 4.11: Rețea stații oceanografice în partea vestică a Mării Negre, INCDM 2016

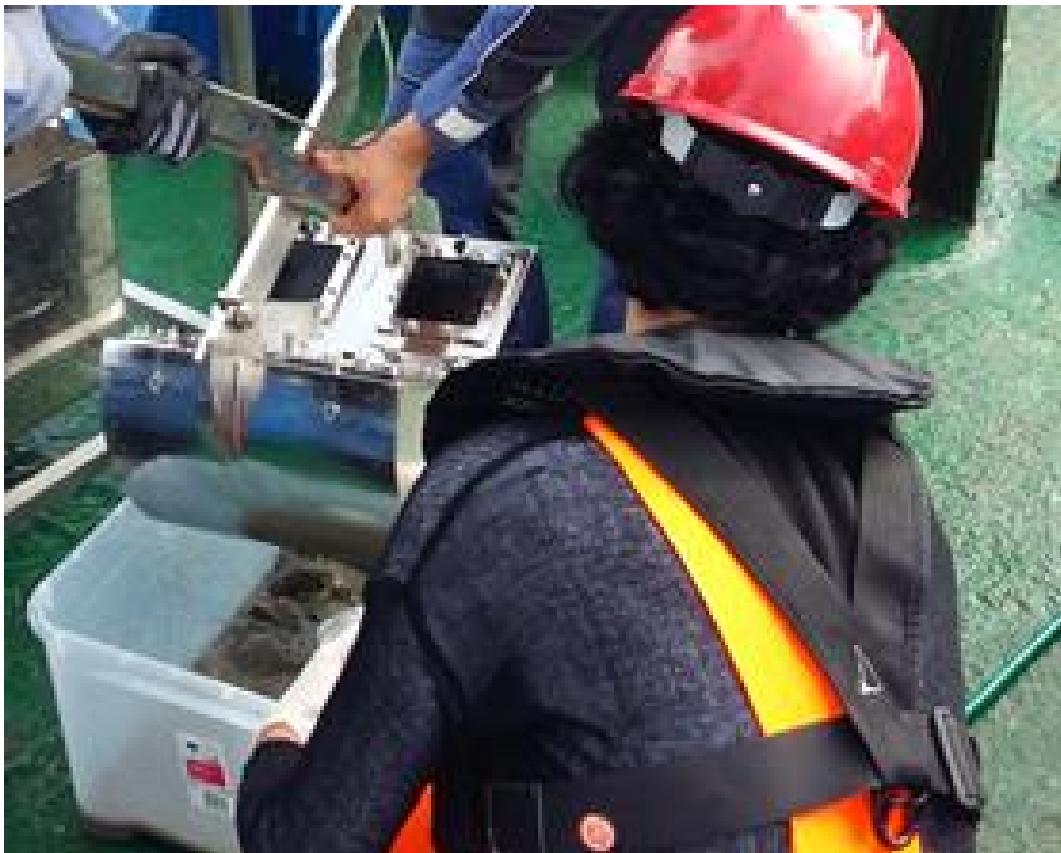


Figura 4.12: Operarea sondei Van Veen pentru prelevarea probelor de sediment.[27]

Rezultate experimentale

Analiza probelor prin metode spectrometrice au dus la identificarea mai multor radionuclizi din seriile naturale alături de radionuclizi specifici incidentelor nucleare din apropierea zonei analizate.

Prelevarea probelor a fost realizată prin deplasarea în zona analizată și ridicarea probelor cu ajutorul aparaturii specifice de la bordul navei. Campania desfășurată în Martie 2016 a presupus prelevarea de probe de sediment marin și probe de apă de la diferite adâncimi. Pentru fiecare astfel probă au fost încapsulate flacoanele de probă cu evitarea contaminării probei datorită instrumentarului sau timpului de expunere la condițiile atmosferice. [27].

Concentrația scăzută a ^{241}Am este evaluată pentru un caz conservativ în care determinarea Activității Minim Detectabile a fost realizată folosind algoritmul ISO în timp ce, pentru măsurători de fond scăzut, specifice probelor noastre, studii din literatură [22] au arătat că activitatea minim detectabilă este în general mult mai scăzută decât uzual raportată. Chiar și în acest caz, forma pick-urilor prezentate în figura 4.19 prezintă caracteristicile bine definite ale acestora ceea ce permite validarea rezultatelor chiar și la limita dată de MDA-ul ISO.

Probele de sol au presupus o analiză detaliată cu corecții de eficacitate specifice

Tabelul 4.9: Rezultatele analizei de spectrometrie gamma pentru probele de apă de mare analizate

Nr.	Crt	Stația	Radionuclid	Activity [$\frac{Bg}{l}$]	MDA [$\frac{Bg}{l}$]
1	Constanța Est 2		^{40}K	$5,10 \pm 0,6$	0,90
2			^{214}Bi	$2,59 \pm 0,34$	0,17
3			^{214}Pb	$2,45 \pm 0,36$	0,20
4			^{241}Am	$0,13 \pm 0,07$	0,12
5	Constanța Est 3		^{40}K	$4,40 \pm 0,51$	0,90
6			^{214}Bi	$0,52 \pm 0,07$	0,18
7			^{214}Pb	$0,56 \pm 0,08$	0,18
8	Constanța Est 4		^{40}K	$3,10 \pm 0,36$	0,98
9			^{40}K	$4,70 \pm 0,55$	0,98
10			^{214}Bi	$1,28 \pm 0,17$	0,18
11			^{214}Pb	$1,06 \pm 0,16$	0,18
12	Sf. Gheorghe 2		^{40}K	$8,30 \pm 0,95$	0,68
13			^{214}Bi	$0,25 \pm 0,03$	0,13
14			^{214}Pb	$0,24 \pm 0,04$	0,14
15	Sf. Gheorghe 3		^{40}K	$17,20 \pm 1,98$	0,84
16			^{214}Bi	$2,02 \pm 0,26$	0,18
17			^{214}Pb	$2,06 \pm 1,26$	0,18
18	Sf. Gheorghe 4		^{40}K	$4,90 \pm 0,57$	0,87
19			^{214}Bi	$1,55 \pm 0,20$	0,17
20			^{214}Pb	$1,26 \pm 0,39$	0,20



Figura 4.13: Detaliu cu probă de sediment prelevată cu ajutorul sondei Van Veen și depusă în container pentru prelevarea probelor în flacoane.[27]

pentru fiecare probă în parte în special datorită densităților diferite din interiorul flaconului probei. De asemenea, dimensiunea atipică a flaconului (un cilindru de 2.5 cm în diametru și înălțimea de 4 cm a presupus evaluarea eficacității prin modelare pentru fiecare probă în parte).

Tabelul 4.10: Rezultatele analizei de spectrometrie gamma pentru probele de sediment analizate

Stația	Adânc. [m]	^{40}K Bq/kg	^{137}Cs Bq/kg	^{232}Th Bq/kg	^{226}Ra Bq/kg
Constanța EST 1	14	254,00 ± 30,00	2,57 ± 0,37	21,00 ± 3,40	17,10 ± 2,40
Constanța EST 2	28	256,00 ± 30,00	22,90 ± 3,00	13,30 ± 2,60	7,05 ± 1,03
Constanța EST 3	36	210,00 ± 25,00	7,09 ± 1,00	6,63 ± 1,45	4,59 ± 0,67
Constanța EST 4	44	211,00 ± 25,00	11,70 ± 1,60	8,38 ± 1,73	5,42 ± 0,80
Constanța EST 5	54	226,00 ± 27,00	11,50 ± 1,50	10,70 ± 1,60	10,70 ± 1,50
Constanța EST 6	85	92,00 ± 10,80	4,69 ± 0,65	4,46 ± 1,24	6,67 ± 0,97
Constanța EST 7	95	117,00 ± 14,00	3,14 ± 0,55	4,51 ± 1,02	9,15 ± 1,32
D-Sud	45	211,00 ± 25,00	18,50 ± 2,40	7,08 ± 1,26	6,75 ± 1,00
D-Est	90	107,00 ± 13,00	9,00 ± 1,20	5,57 ± 1,07	24,6 ± 3,40
D-N	90	132,00 ± 16,00	6,02 ± 0,86	6,15 ± 1,53	17,4 ± 2,50
G Buhaz 1	5	176,00 ± 21,00	1,00 ± 0,19	88,10 ± 12,3	66,40 ± 9,10
G Buhaz 2	20	111,00 ± 13,00	1,59 ± 0,38	6,67 ± 1,51	9,70 ± 1,38
Mila 9-1	5	195,00 ± 23,00	0,94 ± 0,18	53,30 ± 7,30	39,40 ± 5,40
Mila 9-2	20	267,00 ± 31,00	16,8 ± 2,20	15,60 ± 3,80	10,30 ± 1,50
Mila 9-3	30	237,00 ± 28,00	22,60 ± 3,00	14,90 ± 3,70	9,45 ± 1,35
Portița 2	20	237,00 ± 27,00	16,50 ± 2,20	13,40 ± 2,30	8,55 ± 1,25
Portița 3	30	258,00 ± 31,00	15,90 ± 2,10	13,80 ± 2,40	11,80 ± 1,70
Portița 4	50	170,00 ± 20,00	1,06 ± 0,20	8,28 ± 1,46	4,76 ± 0,67
Portița 5	57	110,00 ± 13,00	12,20 ± 1,60	5,36 ± 2,05	6,34 ± 1,05
Portița 6	70	91,00 ± 10,80	4,54 ± 0,68	4,44 ± 0,96	4,75 ± 0,70
Sf Gheorghe 1	1	175,00 ± 21,00	1,17 ± 0,20	36,20 ± 4,70	30,10 ± 4,20
Sf Gheorghe 2	20	262,00 ± 31,00	12,60 ± 1,70	16,30 ± 2,60	9,87 ± 1,40
Sf Gheorghe 3	30	262,00 ± 31,00	26,40 ± 3,50	16,80 ± 2,70	8,65 ± 1,28
Sf Gheorghe 4	40	156,00 ± 18,00	6,56 ± 0,90	9,40 ± 1,70	7,40 ± 1,15
Sulina 2	20	257,00 ± 30,00	18,20 ± 2,40	14,70 ± 2,30	14,10 ± 2,00
Sulina 3	30	77,00 ± 9,30	6,05 ± 0,91	3,51 ± 0,73	3,56 ± 0,52

Prezența radionuclizilor și estimarea distribuțiilor de concentrație sunt puternic influențate de dinamica curentilor marini [35]. Acest lucru este de altfel vizibil și în această lucrare.

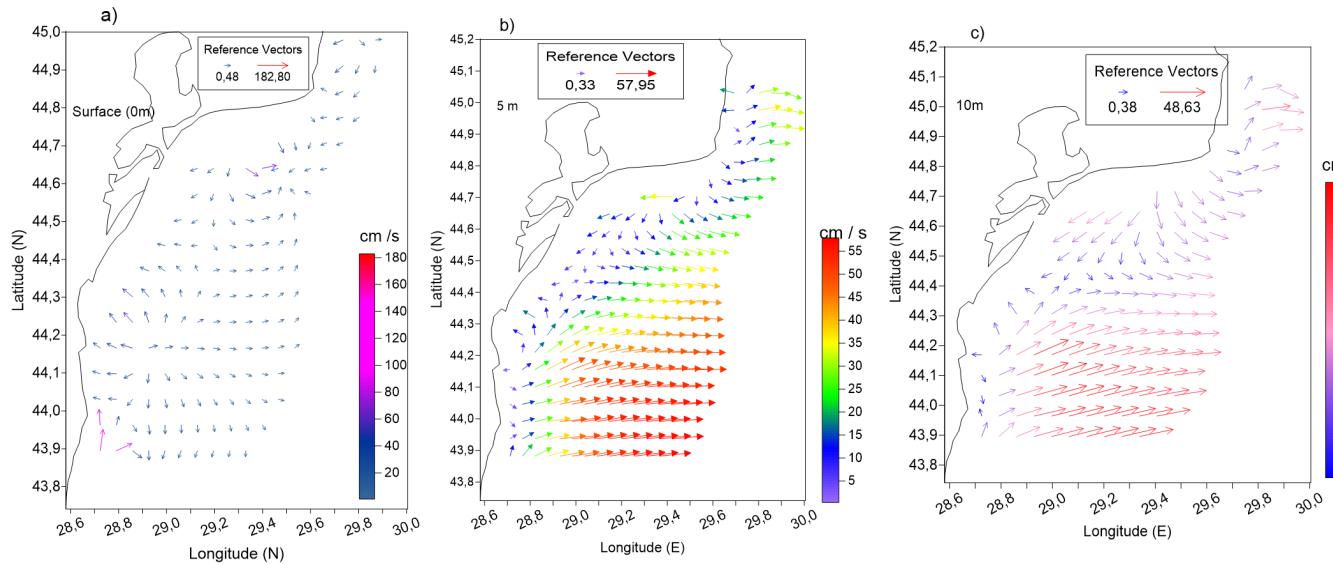


Figura 4.14: Distribuția curentilor marini pe partea vestică a Mării Negre - NIMRD Data.

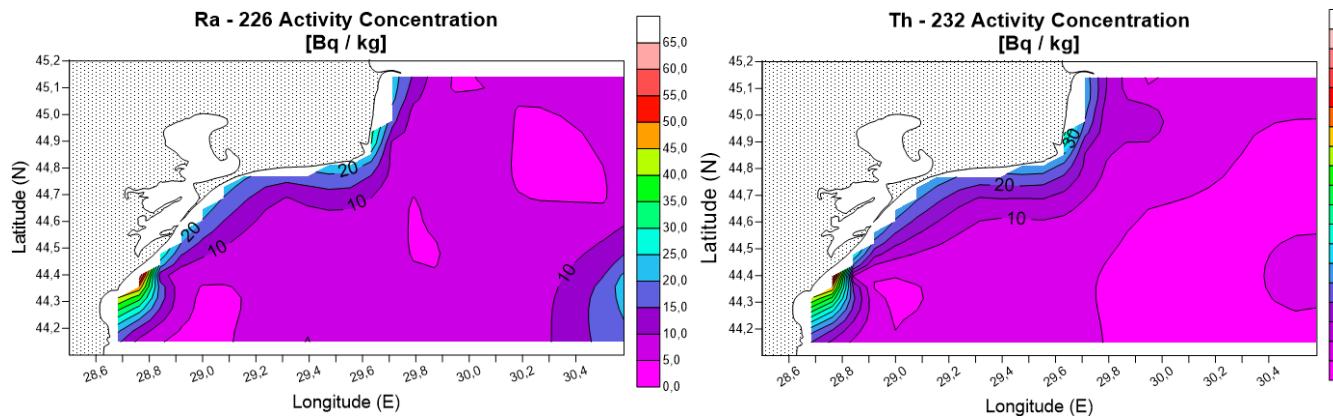


Figura 4.15: Distribuția concentrației de ^{222}Th și ^{226}Ra pe sectorul Românesc al Mării Negre

4.5.4 Concluzii

Marea neagră este un important integrator pentru bazinul hidrografic al regiunii învecinate și reprezintă o zonă de interes sporit în special datorită faptului că fluviul Dunărea se varsă în aceasta. Prin amplasarea ei, în imediata vecinătate a României și a Ucrainei a fost influențată de evenimentele de la Cernobal [8] precum și de deversările de la Centrala NuclearElectrică de la Cernavodă.

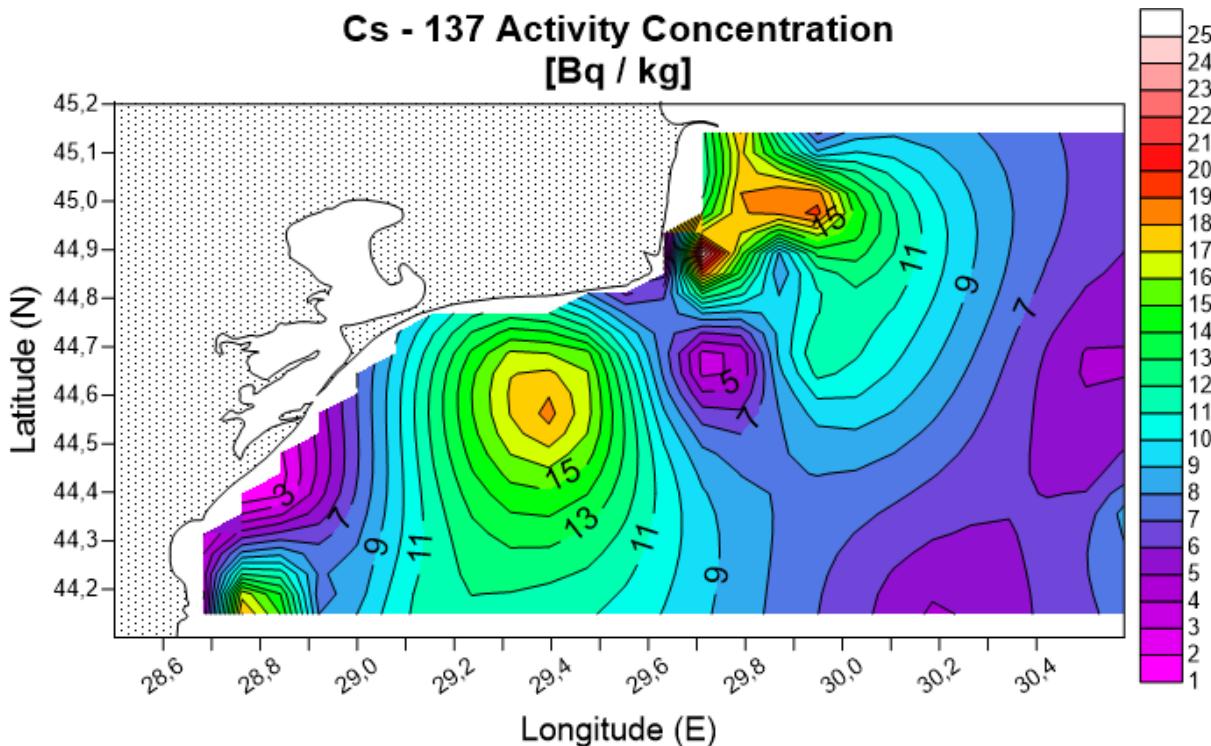


Figura 4.16: Distribuția concentrației de ^{137}Cs (sediment) pe sectorul Românesc al Mării Negre

Un caz interesant este cel al ^{40}K care este asociat de regulă cu prezența materiei organice și care arată o bună concordanță între clorofilă (figura 4.18) și concentrația de potasiu (figura 4.17). Evoluția clorofilei este preluată din literatură [35].

De asemenea, prezentul studiu analizează și radionuclizii de viață lungă eliberați de accidentul de la Cernobal - în special ^{241}Pb care are un timp de înjumătățire de aprox. 14 ani [44, 53] care duc la apariția unei concentrații mai ridicate de ^{241}Am în zona Constanța EST 2.

Desi rezultatele arată o bună concordanță cu studii anterioare [8, 7, 11] pentru probele de sol, probele de apă desă analizate în geometrie Marinelli, nu au prezentat rezultate bine determinate peste limita de detecție (MDA). Cazul Constanța EST 2 unde concentrația de ^{241}Am respectiv de ^{137}Cs sunt trasabile la incidentul de la Cernobal [10, 38].

Schema de dezintegrare a ^{241}Am are două linii γ echiprobabile de 35% una la 26 KeV și cealaltă la 59,5 KeV, ambele fiind evidențiate în spectrul de mai sus (Figura 4.19).

Prezența ^{241}Am este interesantă în contextul accidentului de la Cernobal și forma spectrului gamma furnizat de acesta este plasat într-o zonă cu fond ridicat. Pentru o validare mult mai solidă se pot utiliza metode complementare de spectrometrie α și β pe probe concentrate în prealabil prin diferite metode de digestie chimică.

Rezultatele indică o concentrație mai mică decât cea determinată în marea Iranu-

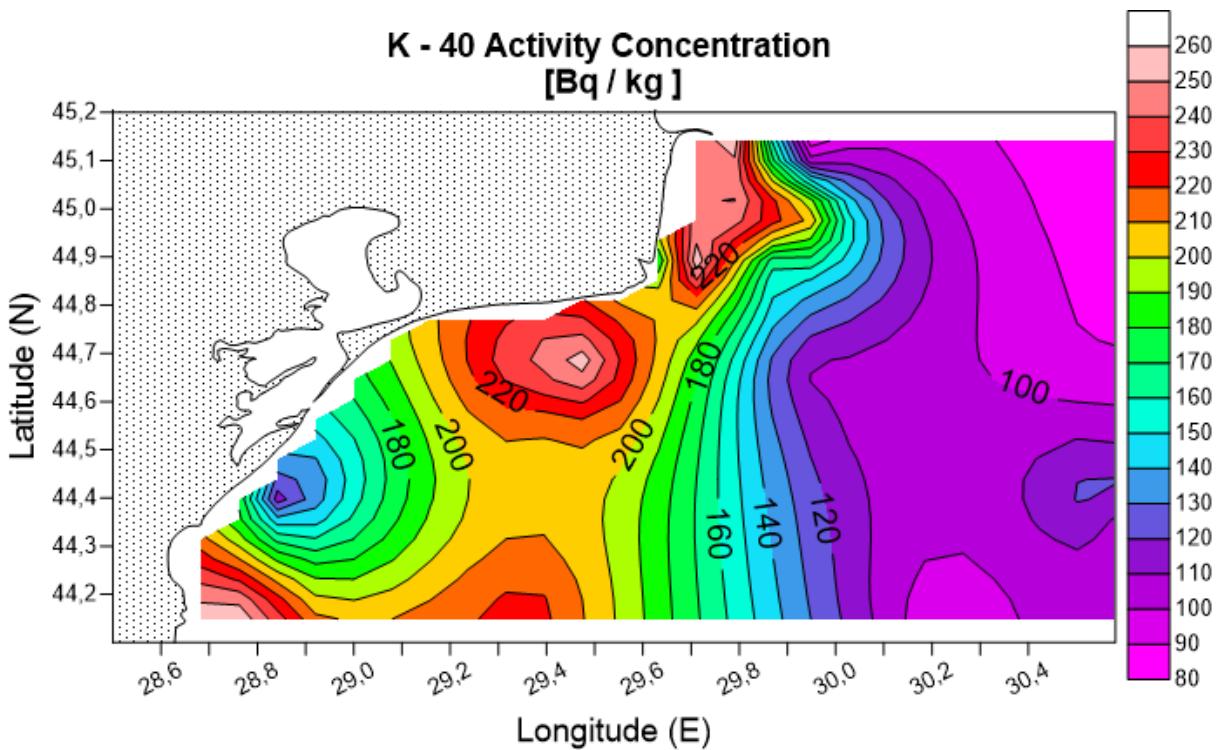


Figura 4.17: Distribuția concentrației de ^{40}K pe sectorul Românesc al Mării Negre

lui de exemplu, unde concentrații mult mai ridicate de produși de fisiune au fost determinate atât în probele de apă cât și în analiza filtrelor de aer prin metode spectrometrice [5, 28].

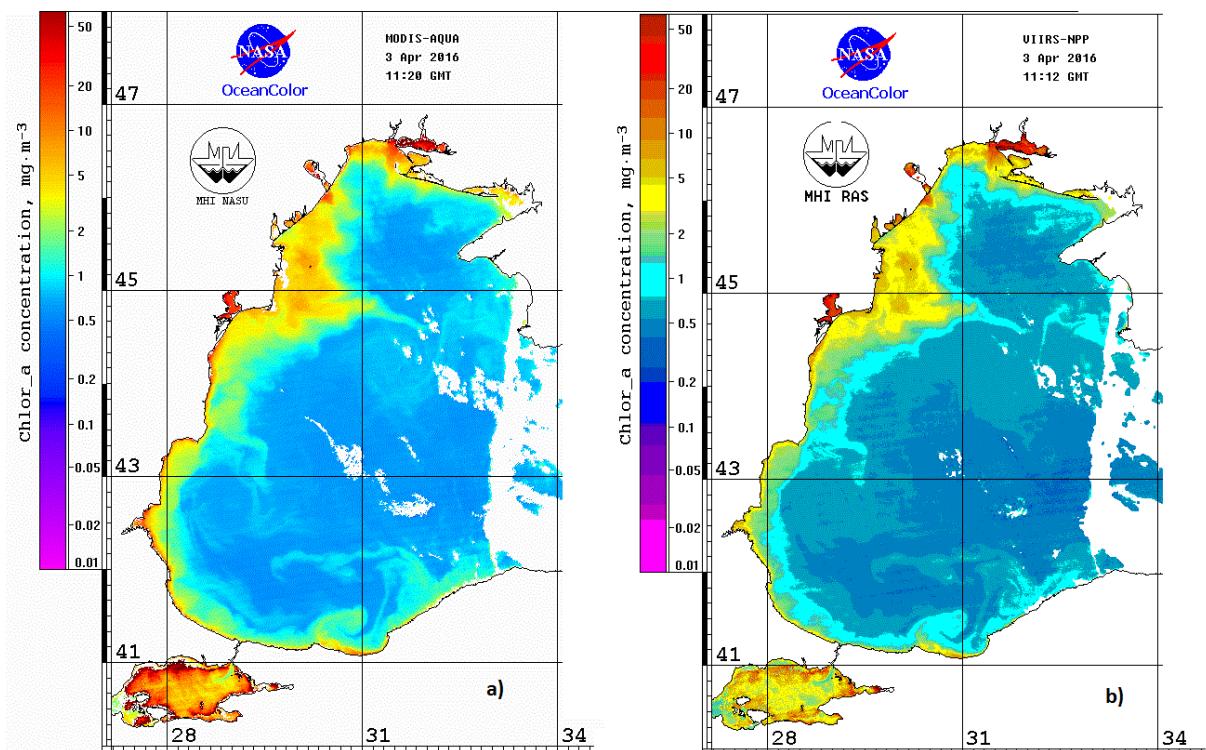


Figura 4.18: Clorofila determinată prin teledetectie [37, 42] pentru sectorul Românesc al Mării Negre în perioada evaluată

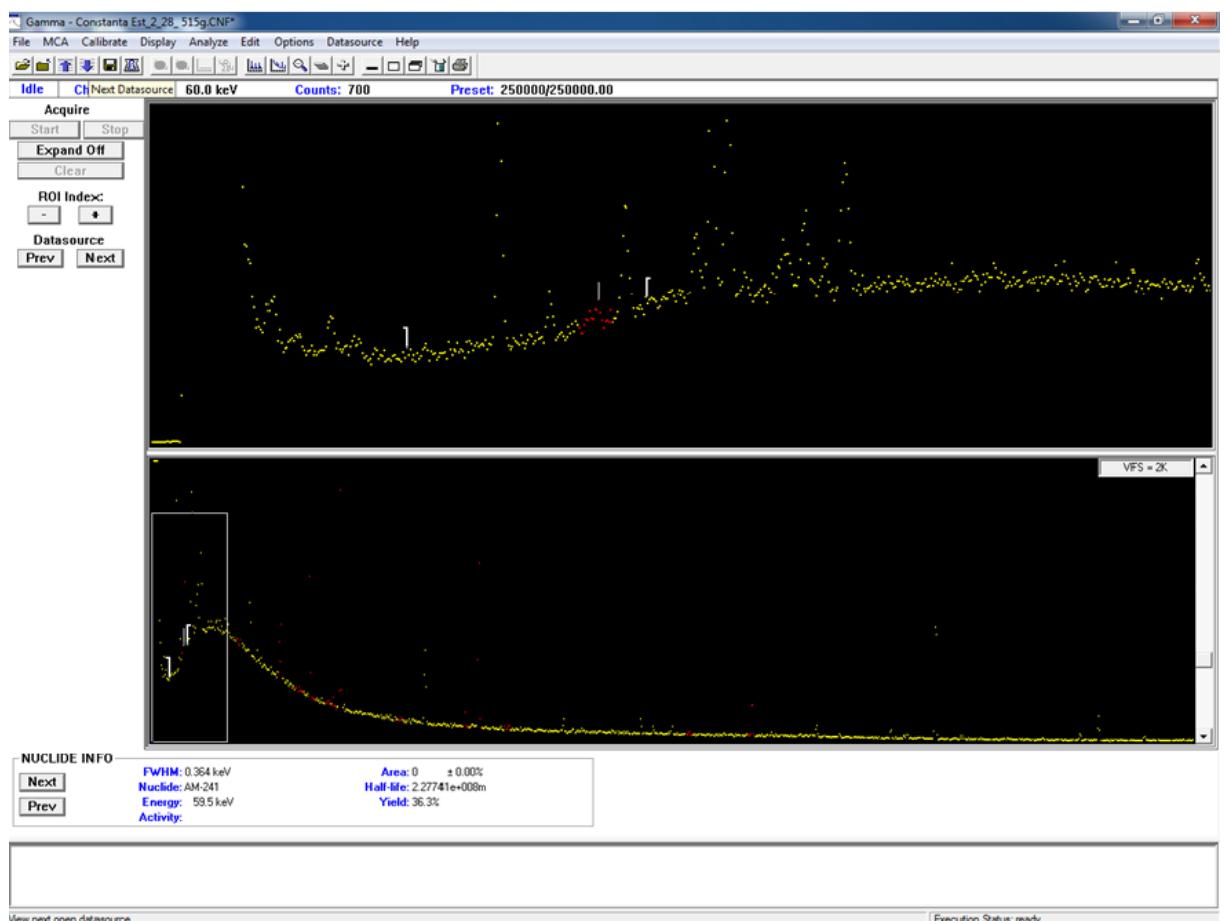


Figura 4.19: Spectrul ^{241}Am

Concluzii Generale

Utilizarea metodelor noi sau îmbunătățite în ultimii ani au permis reducerea limitei inferioare de detecție pentru radionuclizi emițători de radiație aflați în mediul înconjurător. De regulă, riscul radiologic este asociat prezenței acestor radionuclizi reprezentă una dintre preocupările de bază ale autorităților cu responsabilitate în controlul activităților nucleare - cum este cazul Comisiei Naționale pentru Controlul Activităților Nucleare - CNCAN - sau a autorităților internaționale (International Commission for Radiation Protection - ICRP; Națiunile Unite - UNSCEAR; World Health Organization). Aceste organizații propun constrângerile de doză pentru a stabili limitele de expunere a populației la radiație ionizantă dar și persoanele ce își desfășoară activitatea în instituții ce lucrează cu radiații ionizante.

Constrângerile de doză pentru România sunt de 2,4 mSv / an pentru populație și de 20 mSv/an pentru expușii profesionali. Dacă în cazul expușilor profesionali debitele de doză încasate de aceștia sunt atent monitorizate, în cazul populației aceste constrângerile sunt limitate prin evaluarea concentrației de radionuclizi din mediul înconjurător. Astfel, instituții cu abilități în acest sens monitorizează radionuclizii din sol, aer sau apă și evaluatează astfel debitul de doză pentru arii exinse.

În această lucrare am folosit detectori pasivi și activi pentru a evalua debitele de doză ambientală în sol, aer sau apă și rezultatele sunt interesante în contextul în care Marea Neagră funcționează ca un integrator pentru bazinul hidrografic European și al Asiei de Vest (Ucraina). Pentru evaluarea debitelor de doză ambientale a fost necesară utilizarea unor detectori adecvați, cu un răspuns geometric foarte bun și o limită inferioară de detecție scăzută. Din păcate, factorul constructiv al acestor detectori - Harshaw 8855 - limitează cuantele gamma la energia minimă de 50 keV ceea ce se traduce printr-o înregistrare parțială a răspunsului obținut ca urmare a expunerii la Radon.

Analizele de mare eficacitate și precizie au fost realizate cu ajutorul detectorilor de Germaniul Hiperpur (GeHP) care au permis evaluarea unor concentrații foarte mici de radionuclizi în contextul în care probele prezintă anomalii de densitate și concentrație în radionuclizi. Metoda spectrometrică a permis identificarea radionuclizilor specifici incidentului de la Cernobal [14], rezultate aflate în bună concordanță cu cele obținute în campaniile anterioare desfășurate pe aceeași temă [13].

Studiile asupra poluării radioactive în Marea Neagră permit evaluarea riscurilor radiologice la nivel European și în acest context stabilirea unui program de management al Mării Negre este cel puțin la fel de oportun ca și la începutul anilor 2000

[15, 12].

În cadrul evaluărilor realizate pentru probele prelevate din Marea Neagră un aspect interesant a fost detectarea radionuclidului ^{241}Am care apare în probele de mediu doar ca urmare a dezintegrării ^{241}Pu care apare doar în reactoare prin procese de dublă captură de neutroni pe ținta de ^{239}Pu . Acest proces prezintă o secțiune eficace mică ceea ce-l face improbabil în procese naturale apărute ca urmare a reacțiilor apărute cu radiația cosmică. Timpul mare de înjumătățire al ^{241}Pu - de 14 ani - arată că cel mai probabil sursa Americiului detectat este accidentul de la Cernobal [27].

Un aspect deosebit de important asupra expunerii populației la radiație îl reprezintă dozimetria Radonului în special datorită expunerii pe termen lung al persoanelor dar și în contextul în care se pune accentul de izolarea spațiilor locative ceea ce duce de cele mai multe ori la acumularea Radonului. De asemenea, ponderea Radonului și Toronului în doza anuală este estimată la 64% ceea ce înseamnă că în condiții de acumulare și lipsă de ventilație, componenta dozimetrică asociată Radonului poate duce la creșterea directă a dozei înregistrate de persoane. Pentru adresarea acestei probleme se lucrează la cadrul legislativ pentru conștientizarea expunerii la Radon dar și introducerea lui în categoria de risc ocupațional [36].

Pe lângă metodele spectrometrice, utilizarea dozimetriei a permis în cazul evaluărilor de doză ambientală din zona CNE Cernavodă să evidențiem debite de doză extrem de mici caracteristice geologiei orașului Cernavodă prin expunerea pe termen lung a detectorilor pasivi cu TLD și citirea rezultatelor. Acest tip de determinări este unul important deoarece permite estimarea riscului radiologic asociat expunerii la fondul natural de radiație chiar și în cazurile în care utilizarea metodelor spectroetrice este mai puțin facilă din cauza fondului de radiație sau al limitei minime de detecție foarte ridicate ceea ce solicită un timp de expunere suficient de mare pentru a acumula statistică necesară delimitării pick-ului urmărit de fond. Această problemă este cu atât mai pregnantă cu cât energia gamma emisă de radionuclizi este mai mică și se apropie de zona de eficacitate maximă a detectorilor (aprox. 120 keV) unde fondul Compton este unul foarte ridicat, la el contribuind practic marea majoritate a radionuclizilor.

Prezenta lucrare subliniază încă odată necesitatea aprofundării și dezvoltării metodelor radiometrice utilizate în evaluarea riscului radiologic asociat în principal fondului natural de radiație și a aplicat metode specifice pentru determinarea acestui risc asociat expunerilor din diferite zone de interes. Cum spuneam și anterior, un caz aparte este cel al probelor de apă care datorită proceselor coerente și incoerente ce apar au presupus corecții specifice și utilizarea unei geometrii de eficacitate mare (Marinelli).

O dezvoltare ulterioare a acestei lucrări va reprezenta urmărirea surselor de ^{241}Am și posibilitatea de a asigura un mai bun assessment al expunerilor la Radon. De asemenea, o dezvoltare ulterioară ar fi extinderea studiilor pentru probele de aer și corelarea răspunsului detectorilor pasivi utilizati în dozimetria generală pentru monitorizarea riscului radiologic cu tipurile de sol și particularitățile acestora. De

asemenea, pe baza unei statistici mult mai bune se poate încerca o corelare dintre concentrațiile de ^{40}K și concentrațiile de materie organică din interiorul maselor de apă.

Bibliografie

În realizarea acestei lucrări au fost utilizate următoarele referințe bibliografice

- [1] C. Ion P. D. Dumitrescu Octavian D. Niculae G. Alexandru J. et al. A. Chiroșca. “Comparison between responses of TL (Thermo - 8806) and Thermo EPD N2 dosimeters in mixed neutron and gamma fields.” In: *Scientific Communication Session*. Faculty of Physics, University of Bucharest. Faculty of Physics, University of Bucharest, May 2010.
- [2] D. Dumitrescu G. Chiroșca M. Baraitaru A. Nedelcu D. Dobric A. Chiroșca C. Bucur. “Environmental dose rate evaluation within 30 km from the Cernavodă NPP exclusion area”. In: *Program and Abstracts*. Annual Scientific Conference. University of Bucharest, Faculty of Physics. June 2015, p. 98.
- [3] “A Handbook on - Neutron and photon spectrometry techniques for radiation protection”. In: *Radiation Protection Dosimetry* 107.1-3 (2003), p. 9. eprint: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/107/1-3/9.full.pdf+html>. URL: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/107/1-3/9.abstract>.
- [4] F. DRAGOLICI I. PRISECARU G. PAVEL H. POPA A. PETRESCU L. DONE. “THOROUGH INVESTIGATION OF RADON CONCENTRATION VARIATIONS IN BAITA BIHOR (ROMANIAN NATIONAL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY – DNDR)”. In: *Romanian Journal in Physics* 59.9-10 (2014), pp. 1025–1034.
- [5] G. Nicolaou A. Sasahara T. Matsamura and D. Papaioannou. “Neutron and Gamma Ray Rource Evaluation of LWR High Burn-up UO and MOX Spent fuels”. In: *Journal of Nuclear Science and Technology* 41.4 (2004), pp. 448–456.
- [6] inc. ORTEC a subsidiary of AMETEK Advanced Measurement Technology. *Gamma Vision-32 Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulator for Microsoft Windows 2000 Profesional and XP Profesional A66-B32 - Software User Manual*. ORTEC Part No. 783620, 2006.
- [7] R. Margineanu Et Al. A.M. Blebea-Apostu I. Radulescu. “Assessment Of Sedimentation Rate Through The Use Of Anthropogenic ^{137}Cs Radionuclide”. In: *Romanian Reports in Physics* 64.1 (2012), pp. 211–220.
- [8] V. Patrascu A.S. Bologa. “Radioactivity in the Romanian Black Sea Sector One Decade after Chernobyl One Decada after Chernobyl: Summing up the consequences of the incident”. In: *IAEA* (1996).

- [9] United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes*. Vol. 2. United Nations Publications, 2009.
- [10] V.V. Tokarevsky P.N. Vorona A.V. Muravitsky V.F. Razbudey. “Time-dependent ^{241}Am activity in the environment from decay of ^{241}Pu released in the Chernobyl accident”. In: *Applied Radiation and Isotopes* 63.4 (Oct. 2005), pp. 487–492. ISSN: 0969-8043. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.03.018.
- [11] S. Yushchenko V. Maderich B. Valeva L. Kozly and G. Mungov. “Assessment of radionuclide contamination in the Black Sea using POSEIDON/RODOS system”. In: *Radioprotection* 37 (2002). DOI: 10.1051/radiopro/2002210.
- [12] AS Bologa. “Romanian contributions to ongoing Black Sea research and management programmes”. In: *Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies*. Springer, 1999, pp. 367–376.
- [13] AS Bologa, Iolanda Osvath, and C Dovlete. “Cs-137 monitoring in the Romanian sector of the Black Sea coast”. In: *Rapports de la Commission Internationale de la Mer Méditerranée* 34 (1995), p. 224.
- [14] AS Bologa and Vasile Patrascu. “Radioactivity in the Romanian Black Sea sector one decade after Chernobyl”. In: *One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident* (1996), pp. 8–12.
- [15] AS Bologa et al. “Romanian involvement in Black Sea research”. In: *Black Sea research country profiles. Workshop*. 1993, pp. 45–79.
- [16] J. Turculeț C. Cosma. *Radonul și Mediul Înconjurător*. Editura Dacia, 1996. ISBN: 973-35-0594-3.
- [17] CATA. *Tehnici Nucleare - Suport De Curs*. <http://www.physics.pub.ro/Cursuri/Cursuri.htm>, Last seen on Jan 2017. Universitatea Politehnică din București, 2016.
- [18] Bruno Comby. *Energia Nucleară și Mediul*. Editura TNR, 2001. ISBN: 2-914-190-05-0.
- [19] Comisia Națională pentru Controlul Activităților Nucleare. “NSR01 - Norme de Securitate Radiologică - Norme Fundamentale de Securitate Radiologică”. In: *Monitorul Oficial al României Nr. 404 bis* (2000).
- [20] A. Chiroșca D. Dumitrescu. “Neutron field correction coefficients for active and passive dosimeters in Cernavoda NPP”. In: *Optoelectronics and advanced materials - rapid communications* 5.6 (2011), pp. 690–695.
- [21] L Dinescu et al. “Analysis of Thorium and its Progeny by Gamma Ray Spectrometry and Alpha Track Methods”. In: *Radiation protection dosimetry* 97.2 (2001), pp. 181–186.
- [22] L. Done and M-R. Ioan. “Minimum Detectable Activity in gamma spectrometry and its use in low level activity measurements”. In: *Applied Radiation and Isotopes* 114 (2016), pp. 28 –32. ISSN: 0969-8043. DOI: 10.1016/j.apradiso.2016.05.004. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804316301634>.

- [23] L. Done et al. “Gamma-ray spectrometry method used for radioactive waste drums characterization for final disposal at National Repository for Low and Intermediate Radioactive Waste – Baita, Romania”. In: *Applied Radiation and Isotopes* 87 (2014). Proceedings of the 19th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications 17–21 June 2013, Antwerp, Belgium, pp. 380 –383. ISSN: 0969-8043. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.053>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804313004995>.
- [24] Alecsandru Chiroșca Octavian G. Duliu Dorin Dumitrescu. “Radiation surveillance and radiation dose control at Cernavoda Nuclear Power Plant”. In: *U.P.B. Sci. Bull., Series A* 74.1 (2012).
- [25] Octavian Duliu. *Dozimetrie și Radioprotecție*. Editura Universității din București, 2009.
- [26] Catedra de Biofizică Universitatea de Medicină și Farmacie Carol Davila. *Radiatii. Protecția împotriva radiațiilor ionizante*. Suport de curs. Last seen in February 2017. 2017. URL: <http://biofizica-umfcd.ro/people/ap/lp-ro/radiatii.pdf>.
- [27] L.C. Tugulan A. Chiroșca G. Chiroșca M.E. Mihailov. “Radionuclides assessment for the Romanian Black Sea shelf”. In: *Journal of Coastal Research* (2016).
- [28] G. Garnaga K. Jokšas B. Šilobritienė A. Stankevičius S. Šemčuk I. Kulakauskaitė G. Lujanienė N. Remeikaitė-Nikienė. “Transport of ^{137}Cs , ^{241}Am and Pu isotopes in the Curonian Lagoon and the Baltic Sea”. In: *Journal of Environmental Radioactivity* 127 (2013). ISSN: 0265-931X. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2013.09.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.09.013).
- [29] lect. dr. Ghiordeanescu Niculae. *Introducere în utilizarea izotopilor radioactivi*. Tipografia Universității București, 1986.
- [30] ICRP. “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”. In: *ICRP ICRP 37 (2-4).103* (2007).
- [31] T. Jevremovic. *Nuclear Principles in Engineering*. Springer Science+Business Media, LLC, 2009. DOI: [DOI10.1007/978-0-387-85608-7_3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-85608-7_3).
- [32] AJ Khan. “A study of indoor radon levels in Indian dwellings, influencing factors and lung cancer risks”. In: *Radiation Measurements* 32.2 (2000), pp. 87–92.
- [33] et al. L. Done L.C. Tugulan. “Comparison of LabSOCS and GESPECOR codes used in gamma-ray spectrometry”. In: *Applied Radiation and Isotopes* 109 (Mar. 2015), pp. 539–543. ISSN: 0969-8043. DOI: [10.1016/j.apradiso.2015.11.036](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.11.036).
- [34] GIANINA CHIROSCA A.V. CHIROSCA O.G. DULIU L.C. TUGULAN FELICIA M. DRAGOLICI. “RADIATION EXPOSURE IN UNDERGROUND LOW ACTIVITY RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY”. In: *Romanian Journal in Physics* 60.9-10 (2015), pp. 1598–1605.

- [35] Viorica DIMA Maria – Emanuela MIHAILOV Maria – Ionela TOMESCU – CHIVU. “Black Sea Water Dynamics On the Romanian Littoral – Case Study: The Upwelling Phenomena”. In: *Romanian Reports in Physics* 64.1 (2012), pp. 232–245.
- [36] GUVERNUL ROMÂNIEI MINISTERUL SĂNĂTĂȚII. *Normelor sanitare de baza pentru desfasurarea in siguranta a activitatilor nucleare*. MONITORUL OFICIAL NR. 527 din 11 iunie 2004. June 2004.
- [37] Ocean Biology Processing Group NASA Goddard Space Flight Center Ocean Ecology Laboratory. *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Data*. Last viewed Apr 2016. URL: NASAOB.DAAC.
- [38] Nikolai Talerko Sergey Zibtsev Yuri Bondar Andreas Stohl Yves Balkanski Timothy A. Mousseau Anders P. Møller Nikolaos Evangelou Thomas Hamburger. “Reconstructing the Chernobyl Nuclear Power Plant (CNPP) accident 30 years after. A unique database of air concentration and deposition measurements over Europe”. In: *Environmental Pollution* (Sept. 2016), pp. 408–418. ISSN: 0269-7491. DOI: [10.1016/j.envpol.2016.05.030](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.030).
- [39] Societatea Națională Nuclearelectrica. *Raportul Anual 2012*. 2012. URL: <http://www.nuclearelectrica.ro/wp-content/uploads/2015/11/2012-raport.pdf>.
- [40] D. Arnold O. Sima. “Transfer of the efficiency calibration of Germanium gamma-ray detectors using the GESPECOR software”. In: *Applied Radiation and Isotopes* 56 (1-2 2002), pp. 71–75. ISSN: 0969-8043. DOI: [10.1016/S0969-8043\(01\)00169-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00169-5).
- [41] US National Commision on Radiation Protection. “NCRP report no. 93: Ionizing radiation exposure of the population of the United States”. In: *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part B. Nuclear Medicine and Biology* 15.477 (4 1987). DOI: [10.1016/0883-2897\(88\)90020-7](https://doi.org/10.1016/0883-2897(88)90020-7).
- [42] Federal State Budget Scientific Institution Remote Sensing Department. *Marine Hydrophysical Institute of RAS*. <http://dvs.net.ua>, accessed Jan 2017.
- [43] Thermo Scientific. *Harshaw Dosimetry System - System Calibration Procedure*. pub. no. ALGM-W-C-0801-001. 2001.
- [44] H. Funk M.K. Kievets E.M. Lomonosova A. Mansel N. Trautmann O.I Yaroshevich I.V. Zhuk S.F. Boulyga N. Erdmann. “Determination of isotopic composition of plutonium in hot particles of the Cernobyl area”. In: *Radiation Measurements, International Conference on Nuclear Tracks in Solid* (1-6 1997).
- [45] J.L. Shepherd. “Self-contained calibrators/irradiators for personal dosimeters”. In: *Environment International* 20.1 (1994), pp. VIII – . ISSN: 0160-4120. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0160-4120\(94\)90106-6](http://dx.doi.org/10.1016/0160-4120(94)90106-6). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0160412094901066>.
- [46] Octavian Sima. *SIMULAREA MONTE-CARLO A TRANSPORTULUI RADIAȚIILOR*. Editura ALL, 1994. ISBN: 973-9156-69-x.

- [47] H. Smith. “Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters”. In: *Radiation Protection Dosimetry* 20.3 (1987), pp. 195–196. eprint: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/20/3/195.full.pdf+html>. URL: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/20/3/195.short>.
- [48] S. Stroes-Gascoyne. “Measurements of instant-release source terms for ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{129}I and ^{14}C in used CANDU fuels”. In: *Journal of Nuclear Materials* 238.2 (1996), pp. 264 –277. ISSN: 0022-3115. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00440-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00440-0). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311596004400>.
- [49] R.B. Firestone S.Y.F. Chu L.P. Ekstrm. *The Lund/LBNL Nuclear Data Search*. 2009. URL: <http://nucleardata.nuclear.lu.se>.
- [50] Alida Gabor (Timar). *RADIOACTIVITATEA MEDIULUI SUPORT DE CURS*. <http://enviro.ubbcluj.ro/studenti/cursuriLast> seen on Ian 2017. Universitatea Babes Boliay Cluj Napoca.
- [51] Dului O.G Tugulan L.C. “Annual dose rate determination by high resolution gamma spectrometry for TL dating of loess deposits in South-Eastern Dobrudjea, Romania”. In: *Romanian Reports in Physics* 66 (2014), 862–876. URL: http://www.rrp.infim.ro/2014_66_3/A25.pdf.
- [52] Sources Unscear. “Effects of Ionizing Radiation”. In: *United Nations, New York* (2000). Corrigendum 2016.
- [53] A.M. Nikulenkov V.G. Rumynin. “Geological and physiochemical controls of spatial distribution of partition coefficients for radionuclides (Sr-90 , Cs-137 , Co-60 , Pu-239,241 and AM-241) at the site of nuclear reactors and radiactive waste disposal (St. Petersburg region, Russian Federation)”. In: *Journal of Environmental Radioactivity* 162-163 (2016), pp. 205–218. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2016.05.030](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.030).

Lista contribuțiilor proprii

6.1 Lucrări publicate în reviste

6.1.1 Reviste cotate ISI

1. *G. Chiroșca, M.E. Mihailov, L.C. Tugulan, A. Chiroșca (2017 - In press) Radionuclides assessment for the Romanian Black Sea shelf, Journal of Costal Research, Diversity in the Coastal Marine Sciences - A Festschrift Volume in Honor of Alexandru Bologa, In press.*
2. L.C. Tugulan, Felicia M. Dragolici, *Gianina Chiroșca, A.V. Chiroșca, O.G. Dului, (2015) Radiation exposure in underground low activity radioactive waste repository, Rom. Journ. Physics Vol 60, No. 9-10, pp, 1598-1605.*

6.2 Lucrări prezentate la conferințe

6.2.1 Conferințe internaționale

1. Radon Concentration Estimation for the working area within the Radioactive Waste Treatment Station from Bucharest Romania, L.C. Tuglan, A. Chiroșca, D. Vlaicu, C. Ciobanu, F. Dragolici, *G. Chiroșca*, ENVIRA 2017
2. Environmental dose assessment for the radionuclides embedded in building materials used in residential buildings, L.C. Tuglan, A. Chiroșca, A.F. Miclaus, F. Drăgolici, D. Vlaicu, *G. Chiroșca*, ENVIRA 2017
3. The case for accelerator driven nuclear research reactor, A Chiroșca, *G. Chiroșca*, Proceedings of the 2nd CommScie International Conference, Challenges for Sciences and Society in Digital Era, 2015
4. Time Series Analysis for Cyberthreat Detection and Prevention, A. Chiroșca. *G. Chiroșca*, 2013 Sixth International Conference on Developments in eSystems Engineering, pp. 231–235, 2013, doi 10.1109/DeSE.2013.49

6.2.2 Conferințe naționale

1. Environmental dose rate evaluation within 30 km from the Cernavoda NPP exclusion area, A. Chiroșca, C. Bucur, D. Dumitrescu, *G. Chiroșca*, M. Baraitaru, A. Nedelcu, D. Dobric, 2015 Anual Scientific Conference, Faculty of Physics, University of Bucharest, 2015

2. Radon emission interval extraction for personal exposure and dosimetry, *G. Chirosca*, A. Chirosca, 2016 Anual Scientific Conference, Faculty of Physics, University of Bucharest, 2016
3. Containerization for radiation transport software applications, A. Chirosca, *G. Chirosca*, 2016 Anual Scientific Conference, Faculty of Physics, University of Bucharest, 2016
4. Neutron fluence estimation for a light water moderated PuBe source using 8806 TL Dosimeters, V. Dedu, A. Chirosca, *G. Chirosca*, 2016 Anual Scientific Conference, Faculty of Physics, University of Bucharest, 2016

6.3 Cărți

1. *G. Chirosca*, A. Chirosca (2015) *Time Series Analysis for Cyberthreat Detection and Prevention*, 2013 Sixth International Conference on Developments in eSystems Engineering, Developments in eSystems Engineering (DeSE), 2013 Sixth International Conference on, eISBN 978-1-4799-5264-9, ISBN 978-1-4799-5263-2, ISSN: 2161-1343, IEEE, doi 10.1109/DeSE.2013.49
2. The case for accelerator driven nuclear research reactor, A Chirosca, *G. Chirosca*, Proceedings of the 2nd CommScie International Conference, Challenges for Sciences and Society in Digital Era, ISBN: 978-606-13-2892-5, 2015