

Reveica Ion-Mihai

**RADIOACTIVITATEA
ȘI CIRCUITUL
IZOTOPILOR RADIOACTIVI
ÎN MEDIU**

EDITURA UNIVERSITĂȚII DIN BUCUREȘTI



BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITARĂ
București

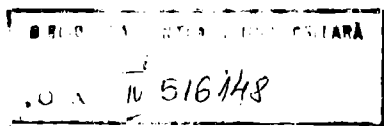
Cota 10.516.148
C# 198901394
Inventar

Reveica Ion-Mihai

**RADIOACTIVITATEA
ȘI CIRCUITUL
IZOTOPILOR RADIOACTIVI
ÎN MEDIU**

152.52

EDITURA UNIVERSITĂȚII DIN BUCUREȘTI
- 1998 -



132 / 99

Referenți științifici: Conf. dr. **Octavian DULIU**
Conf. dr. **Octavian SIMA**

© Editura Universității din București
Șos. Panduri 90-92, București 76235; Tel./Fax: 410 2384

B.C.U. București



C199901394

Tiparul s-a efectuat sub cda 458/1998
la Tipografia Editurii Universității din București

ISBN: 973 – 575 – 278 – 6

CUPRINS

Partea I. Elemente introductive

Cap.1 Planeta Pământ și viața.

	Pag.
1.1. Introducere	7
1.2. Atmosfera terestră	7
1.3. Apele Terrei	13
1.4. Litosfera	15
1.5. Structura internă a Pământului.....	17
1.6. Solul (pedosfera)	19
1.7. Viața pe Pământ	21
1.8. Biosfera.....	29

Cap.2 Radioactivitate și radiații

2.1. Dezintegrarea nucleelor și a particulelor -elementare ca sursă de radiații	31
2.2. Legea dezintegrării radioactive.....	34
2.3. Surse de radiații.....	36

Cap.3. Efectul radiațiilor ionizante asupra substanței vii

3.1. Radiația ionizantă.....	39
3.2. Evenimente fizice inițiale.....	40
3.3. Procese radiochimice la nivel celular. Radioliza apei	41
3.4. Efecte biologice produse prin iradiere	43
3.5. Consecințele iradierii la nivelul tesuturilor	46
3.6. Consecințele iradierii la nivelul întregului organism	47
3.7. Radiobiologia	47

Cap.4. Mărimi dozimetrice (autor O. Sima)

4.1 Introducere	49
4.2 Doza absorbită.....	50
4.3 Echivalentul de doză	52
4.4 Echivalentul de doză efectiv.....	53
4.5 Echivalentul de doză efectiv colectiv	55
4.6 Valori tipice ale dozelor	56

Partea II. Surse naturale de radiații și circuitul izotopilor radioactivi naturali în mediu

Cap.5. Radiația cosmică

5.1. Radiația cosmică primară	59
5.2. Radiația cosmică secundară.....	62
5.3. Originea radiației cosmice.....	65
5.4. Centurile de radiații ale Pământului.....	67
5.5 Doze de iradiere datorate RC.....	68

Cap.6. Izotopi radioactivi naturali (IRN)

6.1. IRN de origine terestră	71
6.2. IRN de origine cosmogenă	72
6.3. Proprietăți fizice și biochimice ale IRN care nu fac parte din familiile radioactive	74

6.4. Proprietăți ale unor IRN din familiile radioactive.....	78
6.5. IRN rezultați din fisiunea spontană a ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th	84

Cap.7. Rocile stâncoase - sursă primară a IRN de origine terestră

7.1. Radioactivitatea rocilor vulcanice	87
7.2. Migrarea IRN din rocile vulcanice spre alte medii.....	89
7.3. Radioactivitatea rocilor sedimentare	90
7.4. Izotopi radioactivi naturali de fisiune și de activare în rocile stâncoase	91

Cap.8. Radioactivitatea și circuitul izotopilor radioactivi din sol

8.1. Sursele de izotopi radioactivi din sol	93
8.2. Atenuarea radioactivității solului	93
8.3. Concentrația unui izotop radioactiv într-o probă de sol	94
8.4. Radioactivitatea α și β a solului	94
8.5. Emanațiile radioactive din sol	95

Cap.9. Radioactivitatea și circuitul IRN în atmosferă

9.1. Originea IRN din atmosferă	97
9.2. Radionuclizii cosmogenici	98
9.3. Radioactivitatea aerosolilor	100
9.4. Emanații radioactive în atmosferă	102

Cap.10. Radioactivitatea și dinamica IRN în apele Terrei

10.1. Radioactivitatea apei chimic pură și a apei naturale.....	107
10.2. Radioactivitatea apelor continentale	109
10.2.1. Ape subterane	109
10.2.2. Râuri	110
10.3. Radioactivitatea naturală a mărilor și a oceanelor	111
10.3.1. Apa marină	112
10.3.2. Sedimentele marine.....	115
10.4. Radioactivitatea apelor atmosferice	

Cap.11. Radioactivitatea naturală a organismelor vii

11.1. Introducere	117
11.2. Radioactivitatea plantelor. Schimbul de IRN cu mediul înconjurător.....	118
11.2.1. Factori care determină acumularea de IRN în plante	118
11.2.2. Reacția plantelor la prezența IRN.....	119
11.2.3. Emițători α în plante.....	120
11.2.4. Emițători β în plante	121
11.3. Radioactivitatea naturală a organismelor animale	122
11.4. Radioactivitatea naturală a corpului omenesc	125
11.5. Metabolizarea și transferul IRN	128
11.5.1. Factori de concentrare și transfer	129
11.5.2. Metabolizarea și radiotoxicitatea IRN	131
11.5.3. Lanțuri trofice	133
11.6. Circuitul IRN în biosferă	

Partea a III-a. Impactul activităților umane asupra radioactivității mediului

Cap.12 Redistribuirea IRN în mediu și creșterea expunerii la radiații datorită activităților tehnologice și gospodărești ale omului

12.1. Principalele căi de redistribuire a izotopilor radioactivi în mediu	135
12.2. Centrale termoelectrice (CTE). Ciclul combustibililor fosili.....	136

12.2.1. Radioactivitatea naturală a combustibililor folosiți în CTE	137
12.2.2. Exploatarea zăcămintelor de combustibili fosili și prepararea combustibilului	138
12.2.3. Arderea combustibilului în CTE.....	139
12.2.4. Utilizarea cenușilor de la CTEC	141
12.3. Combinatele de îngrășăminte fosfatice	142
12.4. Alte căi de creștere a expunerii la radiații în afara și în interiorul clădirilor	144
 Cap.13 Fisiunea nucleară - sursă de energie și de izotopi radioactivi artificiali (IRA)	
13.1. Fisiunea spontană și indusă.....	147
13.2. Energia de fisiune.....	154
13.3. Produsele de fisiune.....	155
13.4. Fisiunea în lanț	159
13.5. Reactoare nucleare	161
13.6. Factorul de criticitate al unui reactor cu uraniu natural. Controlul reactorului.....	162
 Cap.14 Energetica nucleară și mediul. Ciclul combustibilului nuclear	
14.1. Energetica nucleară pe glob.....	169
14.2. Exploatarea și prelucrarea preliminară a minereului de uraniu.....	171
14.3. Fabricarea combustibilului nuclear.....	173
14.4. Producerea energiei electrice. CNE de tip PWR	175
14.5. Depozitarea temporară și reprocessarea elementelor combustibile arse	178
14.6. Deșeurile radioactive. Tratare și depozitare	179
14.6.1. Deșeuri radioactive gazoase	181
14.6.2. Deșeuri radioactive lichide.....	181
14.6.3. Deșeuri radioactive solide	182
14.7. Securitate și risc în energetica nucleară	183
 Cap.15 Explozii nucleare. Arme nucleare	
15.1. Introducere	187
15.2. Bombe atomice (Hiroshima și Nagasaki)	187
15.3. Trăsături caracteristice ale exploziei bombelor atomice.....	189
15.4. Bombe termionucleare cu hidrogen și cu litiu (atulul Bikini).....	191
15.5. Norii radioactivi formați prin explozia bombelor nucleare.....	193
15.6. Interzicerea experimentării bombelor nucleare în atmosferă, sub apă și în cosmos	197
 Cap.16 Izotopi radioactivi artificiali și circuitul lor în mediu	
16.1. Poluarea radioactivă a mediului cu izotopi radioactivi artificiali (IRA)	201
16.2. IRA în atmosferă, transportul și transferul lor	202
16.3. Transportul și transferul radionuclizilor din medii acvatice	205
16.4. Transportul și transferul IRA din mediul terestru	209
16.5. Radiotoxicitatea IRA și metabolizarea lor în organismul uman.....	214
 Cap.17 Supravegherea radioactivității mediului ambiant	
17.1. Introducere	219
17.2. Sisteme internaționale de monitorizare a mediului.....	219
17.3. Rețeaua Națională de Supraveghere a Radioactivității Mediului (RNSRM).....	221
17.4. Măsurători de mediu efectuate în laboratoarele din RNSRM din România.....	223
17.4.1. Măsurători β - globale	223
17.4.2. Măsurători γ -spectrometrice.....	226
17.5. Măsurarea radioactivității corpului uman	228
Bibliografie	231

PREFATĂ

Viața pe Pământ a apărut și s-a dezvoltat în condițiile unei radioactivități naturale generate de izotopii radioactivi naturali existenți în mediul înconjurător (aer, apă, sol) și în condițiile unui flux continuu de radiații provenite de la surse cosmice și de la Soare. Organismele vii care populează planeta, printre care și omul, s-au adaptat la un anumit nivel de radiații, specific fondului natural.

Prin lanțurile alimentare în care sunt implicate, organismele vii participă la redistribuirea izotopilor radioactivi naturali în mediu (alături de alți agenți naturali, cum sunt apa, vântul, erupțiile vulcanice) fără să afecteze în mod esențial fondul natural de radiații.

Omul este singura ființă care poate modifica drastic radioactivitatea mediului prin activitățile sale specifice. El poate să modifice radioactivitatea naturală locală prin redistribuirea izotopilor radioactivi naturali în timpul activităților casnice sau industriale. De asemenea, prin producerea de izotopi radioactivi noi, neexistenți în stare naturală în mediu, omul poate adăuga o componentă nouă la radioactivitatea mediului - „radioactivitatea artificială” - cu toate implicațiile care decurg de aici. Utilizarea energiei nucleare pentru producerea de energie electrică în centrale nucleare electrice sau în scopuri militare pot să modifice controlat sau necontrolat radioactivitatea mediului prin adăugarea componentei artificiale și prin redistribuirea izotopilor radioactivi naturali.

Cartea de față este o introducere în multiplele și complexe probleme legate de radioactivitatea naturală și artificială a mediului și are la bază cursul predat studenților de la Facultatea de Fizică ce se specializează în Fizica Mediului.

Cartea este scrisă la un nivel care o face accesibilă tuturor studenților care au urmat cursul de Fizică nucleară. Datorită actualității temei abordate, care este în strânsă legătură cu problema protecției mediului înconjurător și a omului, cartea poate fi interesantă și accesibilă în egală măsură pentru toți studenții și absolvenții Facultății de Fizică (indiferent de direcția de specializare) și pentru profesorii de fizică din licee.

Sunt convinsă că lucrarea poate fi mult îmbunătățită, atât în formă, cât și în fond, și mulțumesc anticipat tuturor celor care vor contribui cu sugestii și propuneri în acest sens.

*Cu această ocazie doresc să mulțumesc în mod deosebit colegilor de catedră **Prof. dr. V. V. Grecu** și **Conf. dr. O. Sima** pentru posibilitatea creată de a preda cursul de Radioactivitatea mediului și pentru discuțiile, sugestiile și încurajările de care am beneficiat în timpul redactării acestei cărți. **D-lui O. Sima** îi mulțumesc de asemenea pentru amabilitatea cu care a acceptat să colaboreze cu un capitol de dozimetrie la această carte.*

*Mulțumesc, de asemenea, **Cercet. Pr. I Mariana Sahagia** și celorlalți colegi de la Institutul de Fizică Atomică pentru discuțiile purtate și pentru materialele documentare puse la dispoziție.*

Mulțumesc studenților care au audiat cursul și care, prin interesul manifestat și discuțiile purtate, m-au determinat să scriu această carte.

*Pentru tehnoredactarea computerizată mulțumesc călduros fostei mele studente **Ioana Gheorghişan** și fiului meu, **Cercet. Mihai Laurian Ion**.*

mai 1998

Autoarea

ABREVIERI FOLOSITE ÎN LUCRARE

AIEA - International Commission on Radiological Protection
CCF - ciclul combustibilului fosil
CCN - ciclul combustibilului nuclear
CE - coeficient de emanare
CNE - centrală nuclear electrică
CTE - centrală termoelectrică (clasică)
CTEC - centrală termoelectrică pe bază de cărbune
CRIAN - Comisia Republicană de Intervenție în caz de Accident Nuclear
D - doza absorbită
DRG - deșeu radioactiv gazos
DRL - deșeu radioactiv lichid
DRS - deșeu radioactiv solid
ED - echivalent de doză
EDE - echivalent de doză efectiv
EFI - eveniment fizic inițial
FC - factor de concentrare
FD - factor de discriminare
FT - factor de transfer
GEMS - Global Environment Monitoring System
ICIM - Institutul de Cercetare și Inginerie a Mediului
ICRP - International Commission on Radiological Protection
IFIN - Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară
IGBM - Integral Global Background Monitoring
IR - izotop radioactiv
IRA - izotop radioactiv artificial
IRN - izotop radioactiv natural
IRPTC - International Register of Potential Toxic Chemicals
LRM - Laborator de Radioactivitate Mediului
MAPPM - Ministerul Apelor, Pădurilor și Protecției Mediului
RC - radiație cosmică
RCP - radiație cosmică primară
RCS - radiație cosmică secundară
RI - radiație ionizantă
RNSRM - Rețeaua Națională de Supraveghere a radiațiilor mediului
 $T_{1/2}$ - perioadă de înjumătățire
 $T_{1/2}^{SF}$ - perioadă de înjumătățire prin fisiune spontană
UNEP - United Nations Environment Program
UV - ultraviolet

CAPITOLUL 1

PLANETA PĂMÂNT ȘI VIAȚA

1.1. INTRODUCERE

Pământul, a treia planetă în ordinea distanței față de Soare, are o serie de caracteristici care o deosebesc de toate celelalte planete din sistemul nostru solar:

- ☐ Raza medie: $R = 6367,5 \text{ km}$;
- ☐ Densitatea medie: $\rho = 5,52 \text{ g/cm}^3$;
- ☐ Temperatura superficială medie: $T = 15^\circ \text{ C}$;
- ☐ Existența apei în stare lichidă;
- ☐ Prezența unei mari varietăți de organisme vii în stratul superficial.

Vârsta estimată a Pământului este de aproximativ $4 \cdot 10^9$ ani. Înainte de a ajunge în starea actuală, Pământul a trecut printr-o serie de faze în evoluția sa, dintre care menționăm câteva:

■ *Faza cosmică*: este perioada în care se formează elementele chimice cu izotopi stabili și radioactivi, prin reacții nucleare de diferite tipuri, din materia primară (hidrogenul).

■ *Faza planetară*: sunt formate toate elementele chimice terestre și are loc distribuția lor în diferite părți ale Pământului, sub acțiunea legilor fizico-chimice (gazele și elementele ușoare spre periferie, elementele grele spre centru).

■ *Faza magmatică*: Pământul este un lichid incandescent în care elementele ușoare plutesc la suprafață, iar cele grele se concentrează în adâncul lui.

■ *Faza de solidificare*: se formează atmosfera, hidrosfera și litosfera. În această fază, gazele și o serie de compuși volatili sunt evacuate spre suprafață. Apar factori dinamici eolieni și acvatici care, împreună cu erupțiile vulcanice, joacă un rol activ în redistribuirea elementelor chimice pe Pământ, prin acțiuni de erodare, și transport.

■ *Faza apariției vieții pe Pământ*.

Pornind de la periferie spre interiorul Pământului, sunt identificate o serie de straturi care formează structura sa și care diferă între ele prin parametri fizico-chimici: compoziție chimică, stare de agregare, temperatură, dinamică, etc.

1.2. ATMOSFERA TERESTRĂ

Planeta propriu-zisă este înconjurată de o atmosferă a carei compoziție moleculară este: 77 % molecule de azot, 21 % molecule de oxigen, 1 % molecule de argon, 0,03 % molecule de dioxid de carbon și 0,5 % vapori de apă. Multe alte componente sunt prezente în cantități

foarte mici, dar semnificative: anhidridă carbonică, ozon, gaze nobile, metan, oxid de carbon, amoniac. Conținutul extrem de mic de hidrogen și heliu (care sunt atât de abundente în Univers) și concentrația relativ mare a unor gaze precum oxigenul, ozonul, anhidrida carbonică (care sunt atât de rare în materia interstelară) sugerează faptul că atmosfera terestră nu este o „achiziție cosmică”, ci un rezultat al evoluției sale chimice. Se presupune că atmosfera actuală este rezultatul descompunerii la temperaturi mari a constituenților primari din interiorul planetei și a evacuării treptate a produșilor gazoși spre suprafață, în timpul erupțiilor vulcanice.

Greutatea totală a atmosferei este evaluată la $5 \cdot 10^{15}$ tone.

Presiunea atmosferică la sol este, în medie, 1033 g/cm^2 ($=1013 \text{ mb}$). Ea scade la $1/3$ din această valoare la o altitudine de 10 km. Pe măsură ce altitudinea crește, presiunea va scădea continuu.

Densitatea atmosferei planetare este rezultatul echilibrului între forța gravitațională (care are tendința de comprimare a gazului către sol) și forța de presiune (care are tendința de expansiune a gazului).

Atmosfera are o serie de substraturi cu proprietăți specifice (v. fig. 1.1):

□ **Troposfera** - este atmosfera interioară, care ajunge până la altitudinea de 10 km și conține aproximativ $4/5$ din întreaga cantitate de aer. Este în permanentă interacțiune cu suprafața Pământului de la care primește căldură și umezeală prin curenții de convecție (se ridică de la suprafața apelor și a solului umed) și, la rândul ei, influențează viața pe Pământ prin vânturile și precipitațiile care iau naștere în ea.

□ **Stratosfera** - este stratul de aer liniștit și uscat, cuprins între altitudinile de 10 km (limita superioară a troposferei) și de 90 km. Stratosfera este „prea sus” pentru a interacționa cu Pământul, și „prea jos” pentru a simți efectul radiațiilor ultraviolete (UV) venite de la Soare, care sunt absorbite în straturile superioare, fiind o zonă optimă pentru zborul aeronavelor. În stratosferă există și particule de praf care provin ca reziduuri din arderea meteoritilor ce ajung în atmosferă sau din praful vulcanic aruncat în urma erupțiilor vulcanice. Mai recent, în stratosferă au ajuns și particule rezultate în urma exploziilor bombelor atomice și cu hidrogen. Toate aceste particule peregrinează prin straturile stratosferei, în timp ce cad lent spre Pământ, și formează centrii de condensare a vaporilor de apă.

□ **Ionosfera** - este zona care începe la altitudinea de 90 km și formează granița dintre atmosferă și spațiul cosmic. Deși conține doar 1 % din aerul atmosferic total, ea are un rol extrem de important pentru viața pe Pământ, pe care o protejează de acțiunea distrugătoare a radiațiilor ultraviolete (UV) ce vin de la Soare. Dar, sub acțiunea radiațiilor UV, aerul acestei zone periferice este ionizat și rămâne în această stare datorită presiunii foarte mici, și deci a probabilității foarte mici de recombinație a electronilor cu ionii pozitivi. Ionosfera absoarbe și reflectă parțial undele radio și joacă un rol important în comunicațiile radio la distanțe mari. În ceea ce privește variația temperaturii atmosferei cu altitudinea, din fig. 1.1. se observă că, în troposferă și în stratosferă, temperatura scade cu altitudinea, ajungând la valori sub 0°C . În ionosferă, temperatura crește cu altitudinea, ajungând la 100°C la 120 km și la 1200°C (temperatura corespunzătoare topirii plumbului) la altitudinea de aproximativ 250 km. Creșterea temperaturii este provocată de razele ultraviolete venite de la Soare, care ionizează aerul și imprimă electronilor și ionilor pozitivi viteze foarte mari, corespunzătoare unor temperaturi foarte ridicate. Dar, din cauza densității extrem de mici a aerului, conductibilitatea termică este foarte mică.

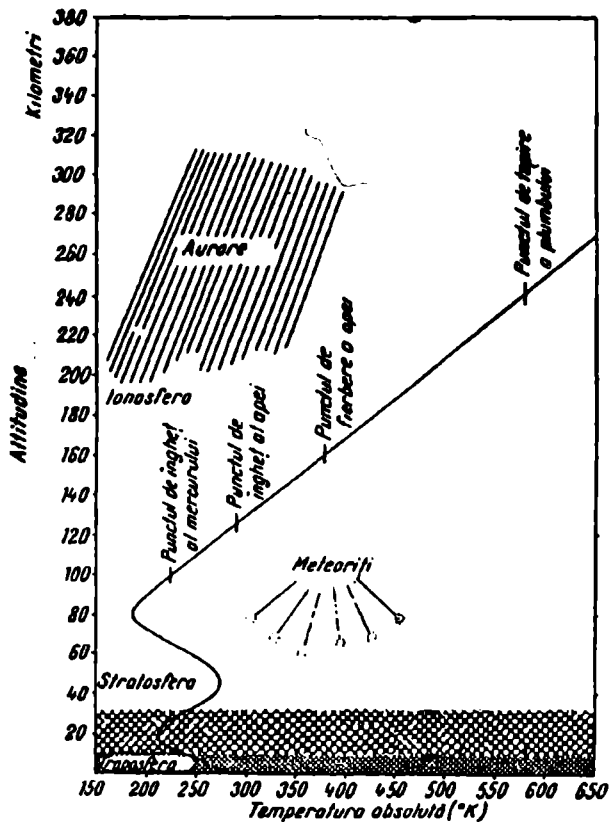


Figura 1.1: Straturile atmosferei și variația temperaturii cu altitudinea (după ref. [1])

Rolul atmosferei asupra vieții pe Pământ este primordial, căci fără ea viața nu ar exista (așa cum nu există viață pe planeta Venus). Iată câteva dintre principalele funcții ale atmosferei, necesare vieții:

- Toate componentele aerului, cu excepția argonului care este un gaz inert, sunt implicate în menținerea vieții pe Pământ. Carbonul, hidrogenul, azotul, oxigenul intră în compoziția proteinelor care formează cea mai mare parte a organismelor vii.
- Atmosfera transformă Pământul într-o enormă seră pe care o menține la o temperatură favorabilă vieții, jucând rolul de moderator între Soare și Pământ. Astfel, energia trimisă de Soare către Pământ sub formă de radiații încălzește Pământul care, la rândul lui, radiază căldura care s-ar pierde în spațiul cosmic dacă n-ar exista bioxidul de carbon și vaporii de apă din atmosferă care o absorb și o reemit spre Pământ. Atmosfera face ca Pământul să rămână cald și confortabil, cu o temperatură medie la suprafață de 15°C . Fără acest gaz, temperatura medie la suprafața solului terestru ar fi de -23°C .
- Atmosfera protejează Pământul de fluxurile de radiații emise de către Soare și de razele cosmice, periculoase pentru substanța vie: raze ultraviolete, raze X, particule de energie mare. Ea absoarbe aceste radiații, lăsând să treacă fracțiuni neglijabile din fluxurile inițiale.

- Atmosfera este cea care apără Pământul și viața de pe el de bombardamentul neîntrerupt de meteoriți de diferite dimensiuni (cu excepția celor mari) și de cele ale corpurilor lansate de om în cosmos, care ard după ce intră în atmosferă.

La rândul ei, atmosfera este influențată de o serie de factori, unii benefici, alții dăunători, pe care este bine să-i cunoaștem și să acționăm la rândul nostru în sensul protejării atmosferei:

○ Plantele și animalele care trăiesc pe suprafața Pământului exercită o influență considerabilă asupra compoziției atmosferei. Plantele consumă anual $5 \cdot 10^{11}$ tone de bioxid de carbon din atmosferă (o treime din cantitatea totală) pe care îl transformă în substanțe organice. Acest gaz este refăcut prin respirația plantelor și a animalelor, putrezirea plantelor moarte, arderea lor, precum și prin alte procese. Fără plante, oxigenul ar dispărea complet din atmosferă, fiind transformat în compuși cu oxigen, și în special în bioxid de carbon.

○ Radiațiile cosmice, radiațiile solare și meteoriții modifică, fie și temporar, compoziția atmosferei.

○ Erupțiile vulcanice.

○ Activitatea antropogenă (și în special cea industrială).

Circulația aerului atmosferic este un fenomen complex, cu rol important în desfășurarea vieții pe Pământ, în special prin fenomenele meteorologice care decurg din el. Caracterul complex al mișcării aerului este efectul mișcării de rotație a Pământului în jurul propriei axe, asupra mișcării aerului datorată diferenței de temperatură dintre ecuator și poli. Așa se generează vânturile de est (alizeele) și cele de vest (museonii), ciclonii și anticiclonii, uraganele și taifunurile, norii, ploile, furtunile, zăpada, grindina, descărcările naturale și alte asemenea fenomene. Datorită devierii laterale a maselor de aer care se mișcă de la ecuator spre poli (pe sus) și de la poli spre ecuator (pe jos), cele două mari vârtejuri care s-ar forma în emisferile nordică și sudică, dacă Pământul nu s-ar învârti, se descompun într-un număr de sisteme circulare mai mici, legate între ele ca roțile dintate ale unei cutii de viteze.

Există trei asemenea sisteme circulare în fiecare emisferă: zona polară, zona temperată și zona subtropicală, în care suflă vânturi relativ puternice și regulate. Acest lucru este evidențiat în figura 1.2.

În zonele polare (între 60° și 90° latitudine nordică și sudică) masele de aer rece se mișcă de la est spre vest, formând două circuite uriașe de aer, care caracterizează regiunea arctică și antarctică. În zonele temperate (între 30° și 60° latitudine nordică și sudică) suflă vânturi predominant vestice (museonii). În zonele subtropicale (între 0° și 30° latitudine nordică și sudică) suflă vânturi calde dinspre nord-est și sud-vest în emisfera nordică și în sens invers în emisfera sudică, vânturi care se numesc alizee. În regiunile de limită dintre zone, aerul se mișcă mai mult pe verticală, iar vânturile practic nu există. La limitele dintre aerul polar și aerul tropical din zonele temperate, numite și fronturi polare, se confruntă aerul rece care coboară dinspre poli și aerul cald și umed care vine dinspre latitudini mici. Aerul cald este forțat să urce deasupra celui rece, se va răci, iar umezeala lui se va transforma în nori. Înaintarea sau retragerea frontului polar este însoțită de ploi, zăpezi și vânturi puternice, care se năpustesc într-un mod destul de imprevizibil asupra teritoriilor traversate de către acest front. Tot în aceste zone de luptă între aerul rece și cel cald se formează vârtejuri de aer numite cicloni, ca urmare a ruperii frontului polar: are loc penetrarea reciprocă a aerului cald

în zona aerului rece și a celui rece în zona celui cald, iar masele de aer se rotesc cu furie în sens invers acelor de ceasornic în emisfera nordică și în sensul acelor de ceasornic în emisfera sudică, ridicându-se vertical. Vârtejul se desprinde de front și înaintează spre zona temperată cu viteza medie de $66 \div 700 \text{ km /zi}$. În mod similar, la limita dintre zona temperată și cea subtropicală iau naștere taifunurile, care se mișcă spre nord în emisfera nordică și spre sud în emisfera sudică, cu viteza medie de aproximativ 1500 km /zi .

Circulația aerului atmosferic joacă un rol important în circulația izotopilor radioactivi naturali sau artificiali ajunși în atmosferă, și în împrăștierea lor în diferite zone ale Pământului. Mișcarea aerului atmosferic constituie factorul eolian care contribuie la modificarea continuă a aspectului planetei și a structurilor ei locale, prin acțiunea de erodare a crustei și prin transportul prafului rezultat. De asemenea, ea influențează și circulația apelor Oceanului Planetar.

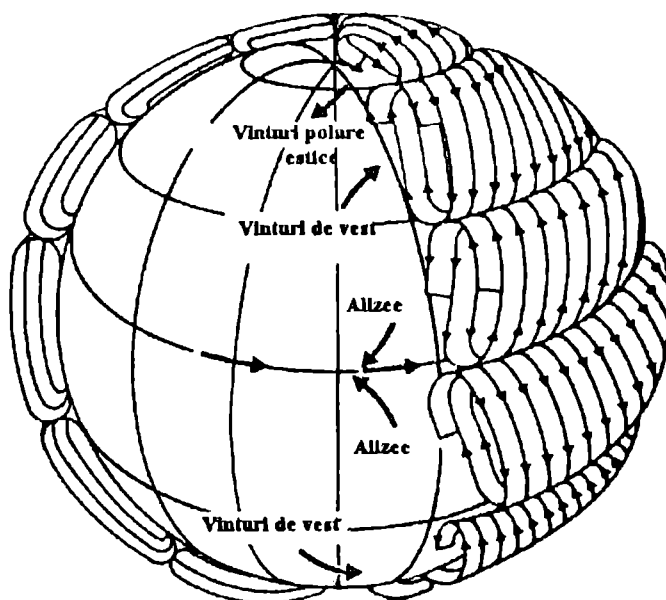


Figura 1.2: Circulația aerului atmosferic în diferite zone ale Pământului

1.3. APELE TERREI

Pe planeta Pământ, apa există în toate cele trei stări de agregare (starea lichidă, starea de vapori și cea de gheață). Apa este întâlnită la suprafața Pământului sub formă de mări și oceane, lacuri și râuri, ghețari, iar în interiorul lui sub formă de pânze freatice și izvoare subterane. În atmosferă apare sub formă de „ape suspendate”: nori, ploaie, grindină, zăpadă, ceață, etc.

Apa planetei se află într-un circuit continuu: de la apele curgătoare către lacuri și Oceanul Planetar (mări și oceane), iar din apele de suprafață în atmosferă și de aici înapoi, sub formă de precipitații, în apele de suprafață și în interiorul Pământului.

Apa este, ca și aerul, un element indispensabil vieții pe Pământ: apa oceanelor, lacurilor, râurilor, mărilor este mediul de viață al majorității organismelor de pe planetă.

Practic, în natură nu există apă pură. Apele curgătoare conțin substanțe dizolvate, erodate din roci și antrenate odată cu apa. Precipitațiile antrenează din aer diverse substanțe și impurități și cad împreună pe Pământ.

Apa marină conține cea mai mare cantitate de substanțe minerale dizolvate. Salinitatea mare a apei marine (în medie 35 ‰) este rezultatul circuitului continuu al acestei ape care se evaporă, cade sub formă de precipitații, parcurge distanțe mari sub formă de ape subterane sau de suprafață, și ajunge din nou în ocean. Pe acest drum lung dizolvă multe substanțe și le aduce în ocean care devine astfel un „lac de acumulare” a acestora, deci și a izotopilor radioactivi aduși mereu de către râuri.

Există o mare diferență între concentrația sărurilor în râuri față de cea din ocean. În apa marină dominante sunt clorurile, care dau, în medie, 88,8 % din salinitate, și doar 0,3 % sunt carbonați. În apa râurilor domină carbonații (60,1 %), iar clorurile sunt numai în proporție de 5,2 %. Unul din factorii care contribuie la aceasta îl constituie faptul că în apele marine carbonatul de calciu, siliciul și alte substanțe sunt folosite de către organismele vii (animale și vegetale) pentru crearea formațiunilor scheletice. După moartea acestor organisme, scheletele și carcasele lor se depun pe fundul mării formând straturi groase de sedimente.

Salinitatea apei marine variază cu poziția locului de unde este luată proba (la mal sau în larg, la suprafață sau în adâncime, în zone secetoase și fierbinți sau în zone cu multe precipitații, zone unde se varsă mai multe râuri, fluvii, etc.).

Dinamica apelor Oceanului Planetar este influențată de mișcarea de rotație a Pământului în jurul propriei axe, de atracția lunii (mareele), de configurația platformelor continentale, de Soare, de interacția cu vânturile din atmosferă.

Ca și în aerul atmosferic, există o circulație a apelor oceanice, îngrădite de continentele care separă Oceanul Planetar în mai multe bazine și care complică sistemul de curenți oceanici.

Se observă formarea a doi curenți ecuatoriali (de nord și de sud) cu aceeași direcție, corelați cu alizeele, a doi curenți subtropicali (de nord și de sud) sub formă de vârtejuri ce se rotesc în sens invers în cele două emisfere și sunt corelați cu acțiunea vânturilor de vest. În Oceanul Arctic se formează curentul arctic, generat de vânturile arctice (vânturi polare de nord). În Antarctica, curentul va fi influențat de vânturile de vest și nu de cele polare.

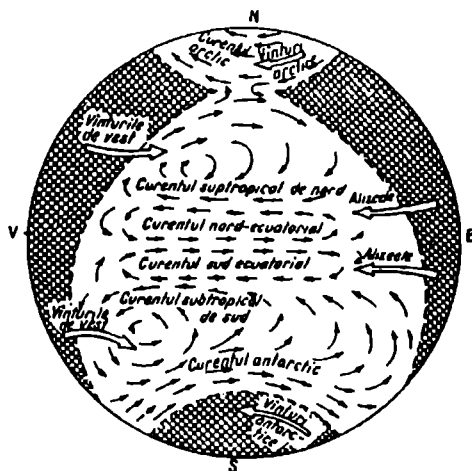


Figura 1.3: Schema corelației dintre curenții atmosferici și curenții marini (acvatici)

1.4. LITOSFERA

Din punct de vedere al proprietăților fizice Pământul este format din trei pături concentrice de ordinul întâi: **scoarța, mantaua și nucleul.** Partea pietroasă a planetei se numește **litosfera** (lithos = piatra în limba greacă) și înglobează în ea scoarța terestră (cuprinsă între suprafață și o adâncime medie de 35 km) și partea superioară a mantalei (până la adâncimea de aproximativ 1200 km).

Scoarța terestră

Elementele chimice mai grele ale planetei noastre au format litosfera (scoarța solidă a Pământului). Ele se află sub formă de compuși chimici numiți minerale.

Cele mai răspândite elemente sunt: oxigenul (46,7 %), siliciul (27,7 %), aluminiul (8,1 %), fierul (6,7 %), calciul (3,5 %), sodiul (2,7 %), potasiul (2,6 %) și magneziul (2 %). Combinațiile chimice ale acestor elemente formează mineralele din care sunt formate rocile scoarței terestre: cuarțul (SiO_2), feldspatul (combinație de O, Si și Al), combinații ale O-Si-Al cu Ca, Na și K (exemplu: anortit $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$, albit $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, ortoclaz $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, etc.) sau cu Mg și Fe (exemplu: $\text{Ca}(\text{Mg, Fe, Al}) (\text{Si, Al})_2 \text{O}_6$ augit).

Rocile eruptive sunt un amestec de cristale din diferite minerale pure. Granitul, principalul constituent al continentelor, este format din 31% cuarț, 53 % feldspat și cantități mici din minerale mai puțin abundente, cum ar fi mica. Bazaltul este mai greu decât granitul și, în general, este situat în zonele cu activitate vulcanică, conținând 46 % feldspat, 40 % augit (Fe, Mg, Ti) și aproape deloc cuarț.

Gresiile sunt formate din fragmente de granit în urma unor procese de dezagregare și diogenează.

În calcare se află, în loc de cuarț, o acumulare de mici cochilii, fragmente de corali, resturi de animale marine, etc. Depozitele calcaroase par a fi cimitirele vieții marine din trecut. Calcarul este un carbonat de calciu (CaCO_3) extras de animalele marine din apă.

Marmura are o structură chimică asemănătoare cu cea a calcarului, dar o cu totul altă textură. Marmura naturală se formează atunci când straturile de calcare sunt acoperite cu lava fierbinte ce iese la suprafață. Sub acțiunea căldurii și a greutateii lavei, carbonatul de calciu și resturile organice recrystalizează complet în granule fine, simetrice. Asemenea roci, produse prin recrystalizarea rocilor mai vechi, se numesc metamorfice.

Înfățișarea actuală a planetei este rezultatul unor procese complexe și continue.

Există doi factori principali care schimbă complet și continuu fața Pământului:

□ Activitatea tectonică, cu originea adânc sub scoarța terestră, produce deformări, prăbușiri și ridicări ale diferitelor straturi ale scoarței, contribuind la apariția catenelor muntoase.

□ Eroziunea, cauzată în special de ape și în mai mică măsură de vânt, lucrează în sens invers: macină munții și nivelează continentele. Materialul erodat este transportat de râuri și ajunge în mare, formând straturi sedimentare alternative de gresie și calcare sau straturi magmatice dacă în urma erupțiilor vulcanice sunt acoperite sedimentele cu lavă.

Astfel, scoarța terestră apare ca fiind formată din blocuri mari de granit (densitate $2,6 \div 2,7 \text{ g/cm}^3$) continentale, presărate într-un strat bazaltic mai subțire dar mai dens ($3,2 \text{ g/cm}^3$) care formează și fundul bazinelor oceanice.

Granitul și bazaltul sunt roci magmatice, derivate din cristalizarea silicaților. Rocile sedimentare (calcare, argile, gresii) rezultă din pietrificarea (litificarea) sedimentelor.

Mantaua

Această pătură sferică a Pământului cuprinsă între 3500 și 6500 km de la centrul Pământului conține cea mai mare parte din volumul planetei (82%) și cea mai mare parte din masa ei (69%).

Datorită temperaturilor înalte și a presiunilor foarte mari din această zonă, materia din care este formată are o anumită vâscozitate. Rocile foarte fierbinți și puternic comprimate din manta au, datorită acestei vâscozități, proprietatea de plasticitate.

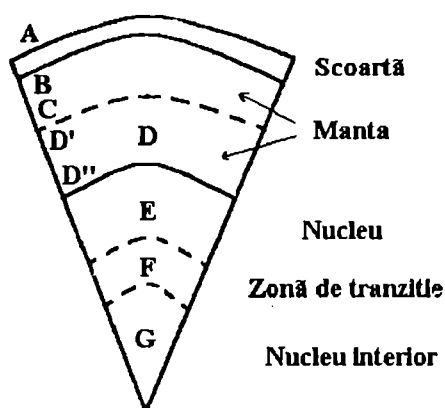


Figura 1.4: Pături sferice concentrice separate prin suprafețe de discontinuitate în propagarea undelor seismice în interiorul Pământului

Stratul subcrustal (zona B din fig. 1.4), până la adâncimea de 400 km, are o vâscozitate care permite echilibrul hidrostatic al scoarței, având rol de saltea pentru masele continentale enorme pe care le suportă și sub greutatea cărora se îndoaie în timp, se deformează. Aici își au sediul focarele cutremurelor de suprafață.

În pătura C a mantalei (fig. 1.4), cuprinsă între 400 și 1000 km adâncime, materia se află în stare amorfă și are o vâscozitate mai mare decât în zona B. Neomogenitățile din compoziția ei, cu variații de presiune și temperatură, produc deplasări de materie, constituind focare ale cutremurelor de adâncime.

Între adâncimile de 1000 și 2900 km (zona D în fig. 1.4) se află „mantaua inferioară”, cu o compoziție chimică uniformă, și mult mai bogată în fier decât mantaua superioară (zona C).

Nucleul

În fig.1.4 sunt reprezentate cele trei pături interne E, F, G, care formează nucleul Pământului, începând de la adâncimea de 2900 km și până în centrul acestuia.

În învelișul E (numit și nucleu exterior), cuprins între adâncimea 2900 și 4980 km, materia are proprietăți fizice specifice unui fluid (lichid sau gaz), evident consecință a temperaturii și presiunii foarte ridicate.

Materia din zona sferei centrale de rază 1250 km (zona G din fig. 1.4) are proprietățile fizice ale unui corp solid, cu o compoziție chimică presupusă a fi formată din fier și nichel, asemănătoare compoziției a cca 10% din meteoriții studiați.

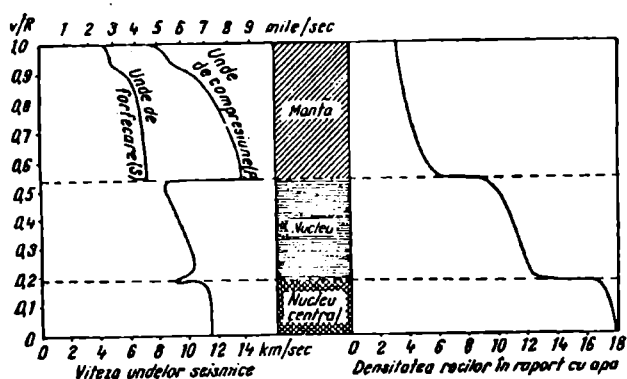


Figura 1.5: Variația undelor seismice cu adâncimea. Un model de structură a interiorului Pământului corelat cu studii seismice (ref.[1])

Acești meteoriți sunt formați numai din fier, cu adaosuri mici de nichel și crom și se presupune că sunt fragmente dintr-o planetă care, cândva, a evoluat pe o orbită aflată între Marte și Jupiter

În sprijinul acestei ipoteze, vine și variația vitezei undelor seismice P cu adâncimea (fig. 1.5), care, în zona de tranziție (F din figura 1.4) de la nucleul exterior la cel interior, suferă o inflexiune explicată prin trecerea de la fierul lichid la fierul solid.

Nucleul de fier al Pământului poate fi corelat cu magnetismul pământesc pe care-l generează și cu existența polilor magnetici (diferiți de cei geografici).

Există o serie de dovezi (printre care și cele de natură magnetică) care indică o alunecare a scoarței terestre solide spre est, în raport cu corpul principal al Pământului, cu o viteză de aproximativ 30 km /an.

1.5. STRUCTURA INTERNĂ A PĂMÂNTULUI

Studiul interiorului Pământului cu ajutorul forajelor continentale efectuate în diferite zone geografice (adâncimea maximă ≈ 15 km) indică o creștere a temperaturii cu adâncimea, indiferent de zona geografică, cu aproximativ 8°C la fiecare 300 m. Astfel, la adâncimea de aproximativ 3 ÷ 4 km temperatura rocilor atinge punctul de fierbere al apei. Gheizerele fierbinți sunt rezultatul fierberii apelor care pătrund prin crăpăturile scoarței până la aceste roci fierbinți și care apoi sunt aruncate din nou la suprafață, sub acțiunea presiunii vaporilor. Dacă se admite o creștere liniară a temperaturii cu adâncimea, rezultă că la adâncimi de aproximativ 45 km se ating temperaturi de ordinul a 1300°C , suficiente pentru topirea rocilor. Lava aruncată de vulcani are, de regulă, această temperatură (în interiorul craterelor) fapt care arată că scoarța Pământului are o grosime foarte mică (45 km) în comparație cu raza acestuia.

Alte mijloace de investigare a interiorului Pământului se bazează pe studiul propagării undelor seismice (unde elastice) generate în timpul unui cutremur, de la focarul situat în interiorul Pământului la suprafața acestuia. Se știe că undele elastice (seismice) sunt de două tipuri: unde de presiune, longitudinale (unde P) și unde de forfecare, transversale (unde S). Viteza de propagare a undelor P este de două ori mai mare decât a undelor S, în majoritatea materialelor.



La un cutreimur, mișcarea solului generată de undele P coincide cu direcția de propagare a acestora, în timp ce mișcarea generată de undele S este perpendiculară pe direcția lor de propagare. Undele S nu se propagă în medii lichide. Datorită construcției lor, seismografele pot distinge undele P de undele S. Astfel, la fiecare cutremur se înregistrează două zguduri succesive, decalate în timp printr-o perioadă de calm: prima este provocată de undele P, iar cea de a doua de undele S. Viteza undelor seismice (P și S) este mai mare în mediile mai dense și de aceea rezultă că, dacă de la același focar seismic (vezi fig. 1.6) unda se propagă simultan pe două căi diferite, cu densități diferite, la punctul de observare se vor înregistra două unde (cutremure), decalate în timp, deși au fost generate simultan.

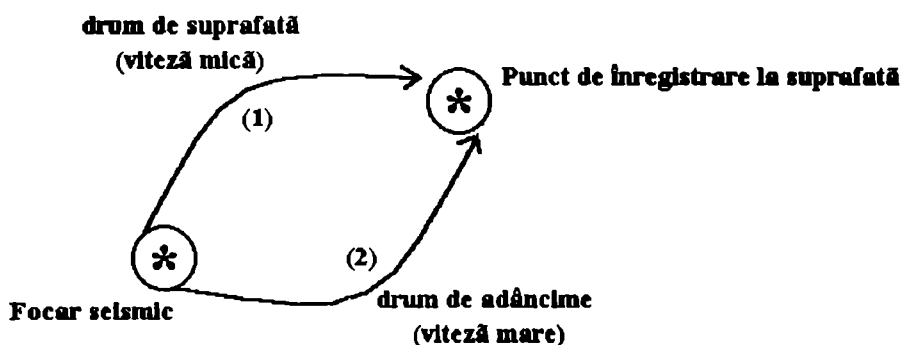


Figura 1.6: Variația vitezei undelor seismice P cu adâncimea.

Studiind asemenea decalaje, s-a pus în evidență existența așa-numitei „discontinuități Mohorovicic” (Moho), o linie care separă un înveliș exterior, mai ușor al Pământului, numit *scoarță* de un înveliș interior, mai greu, numit *manta*. Această linie de separație înconjoară Pământul la o adâncime medie de aproximativ 35 km (dar variabilă între 20 ÷ 80 km) în zonele continentale și la o adâncime ce variază între 5÷15 km sub fundul Oceanului Planetar. Aceste rezultate au condus și la inițierea unor foraje oceanice de adâncime pentru studiul structurii mantalei, mai ușor de realizat decât forajele continentale.

Studiul undelor seismice produse de cutremure puternice înregistrate pe toată suprafața Pământului, a condus și la alte informații interesante. Astfel, s-a pus în evidență așa-numita „zonă de umbră”, o zonă circulară, situată între epicentru (punctul de la suprafața Pământului cel mai apropiat de focar, unde ies undele seismice) și antipod (E).

„Zona de umbră” are următoarele caracteristici:

- În cazul unui cutremur puternic, undele seismice se înregistrează pe toată suprafața Pământului, cu excepția acestei zone (zona 2 din fig. 1.7).
- Între epicentru și zona de umbră (zona 1 din fig.1.7) undele seismice conțin atât componenta P cât și componenta S.
- Între „zona de umbră” și antipodul epicentrului, unda seismică conține numai componenta P.

Toate aceste observații pot fi explicate dacă se presupune că Pământul conține un miez interior cu următoarele proprietăți:

- ☐ este format dintr-o materie foarte densă;
- ☐ se află în stare lichidă;
- ☐ are raza aproximativ 60 % din raza Pământului.

Undele seismice care trec prin miezul lichid și foarte dens al Pământului vor suferi două modificări: de structură și de direcție. Fiind în stare lichidă, miezul oprește unda S și lasă să treacă numai unda P. Datorită densității mult mai mari a miezului decât a zonei mantalei, miezul va acționa ca o lentilă convergentă asupra undelor seismice (componenta P) focalizându-le spre zona antipodului epicentrului E.

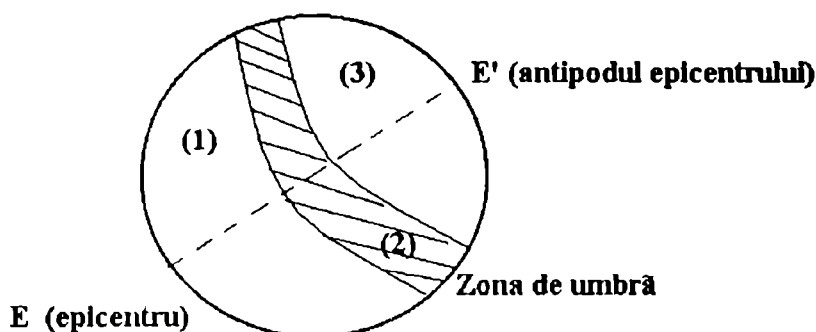


Figura 1.7: Zona de umbră seismică a Pământului

Aceste observații au condus la concluzia existenței unui miez foarte dens, lichid, al Pământului.

Viteza de propagare a undelor seismice spre centrul Pământului prezintă, de fapt, o serie de discontinuități de tip Mohorovicic și, pe baza lor, s-au propus diferite modele de structură internă a Pământului, unele mai simple (ca în fig. 1.4), altele mult mai complexe.

În aceste modele se înglobează, de regulă, și rezultate obținute prin foraje continentale sau oceanice, precum și alte informații, ca de exemplu cele legate de magnetismul terestru, de proprietățile și structura meteoriților sau informații din astrofizică, etc., astfel încât reprezentarea noastră despre structura internă a Pământului să fie cât mai consistentă și mai aproape de realitate.

Astfel, s-au conturat cele trei zone distincte, trei pături sferice concentrice: **scoarta, mantaua și nucleul** Pământului, care diferă prin proprietăți fizice ca: densitatea și starea de agregare. La rândul lor, mantaua și nucleul sunt subdivizate în mai multe pături concentrice separate prin suprafețe de discontinuitate în propagarea undelor seismice în interiorul Pământului.

Toate modelele de structură internă a Pământului au în comun selectarea și gruparea gravitațională a elementelor chimice: elementele ușoare s-au adunat la suprafața planetei, iar cele mai grele au migrat spre centrul Pământului. Materialul terestru este, deci, dispus în pături sferice concentrice în care predomină elemente chimice din ce în ce mai grele, mergând de la suprafață spre centrul Pământului.

1.6. SOLUL (PEDOSFERA)

Solul este un produs al unor procese multiple a căror esență o constituie sinteza și descompunerea substanțelor organice de către plante și microorganisme. Substratul de bază pe care au loc procesele biochimice este format din produșii rezultați prin distrugerea rocilor de munte, și anume a substanțelor minerale.

Principalii agenți care erodează rocile de munte și transportă acești produși de erodare sunt apa și curenții de aer.

Apa este un bun dizolvant pentru multe substanțe minerale: ea pătrunde în crăpăturile și în porii rocilor de munte, „spală” aceste roci, dizolvă și aduce compușii minerali din adâncul scoarței la suprafața ei, în mediul biogenezei. Pe de altă parte, apa, deplasându-se pe suprafața Pământului, rupe fragmente mai mici sau mai mari de rocă, le antrenează în mișcarea ei și le deplasează odată cu ea sub formă de suspensii, depunându-le sub formă de sedimente la distanțe mari de locul de origine, cantitatea de substanță solidă transportată de apele curgătoare fiind foarte mare. În afara suspensiilor minerale, apa transportă și săruri minerale dizolvate în cantități foarte mari.

La distrugerea rocilor participă și organismele vii. Primele organisme care participă la distrugerea rocilor de munte sunt bacteriile, după care urmează lichenii, mușchii, și apoi vegetația mai înaltă. Prin participarea la distrugerea rocilor și realizând apoi sinteza substanței organice, vegetația este sursa principală care îmbogățește solul în substanță organică, în special prin produșii săi de descompunere. În plus, vegetația este principala sursă de hrană pentru organismele animale și pentru om și face ca substanțele minerale să intre în lanțuri alimentare complexe (lanțuri trofice), de la organismele cele mai simple la cele mai dezvoltate, după schema: sol-vegetație-animal. La rândul lor, organismele animale, prin substanțele eliminate în timpul vieții lor și prin substanțele rezultate din descompunerea organismului lor după moarte, contribuie la formarea solurilor.

În concluzie, se poate spune că solurile sunt formațiuni de suprafață mineralo-organice, care întotdeauna au propria lor istorie (origine). Totdeauna și pretutindeni, solul este rezultatul unei mulțimi de relații reciproce între roca stâncoasă mamă și organismele care trăiesc și au trăit aici (plante, animale), clima, vârsta și relieful locului.

Solurile sunt caracterizate de o structură normală cunoscută, de o grosime normală și de o poziție normală.

Una dintre proprietățile esențiale ale solului este fertilitatea, respectiv capacitatea de a satisface nevoile de apă, de substanțe minerale nutritive și de aer pentru plante.

De regulă, solurile se formează din materiale afânate, minerale și organice, aflate în anumite proporții. Pentru majoritatea solurilor, componenta minerală este preponderentă, numai în solurile mlăștinoase care conțin turbă predomină componenta organică.

Solul prezintă mai multe componente de bază:

- ☐ Partea anorganică a solului este formată preponderent din particule mici din diferite minerale, cu dimensiuni ce nu depășesc un mm, sfărâmături de roci cum ar fi pietrișuri, nișipuri, praf și argile.
- ☐ Partea organică este alcătuită din substanțe vegetale și animale. Această parte este intim amestecată cu cea anorganică, formând un complex organo-mineral.

Partea organică descompusă, încorporată solului prin transformarea ei de către microorganisme, se numește humus, are culoare neagră sau brună, se mineralizează greu, iar procesul lui de dezintegrare este foarte lent. Humusul joacă un rol important în formarea însușirii de fertilitate a solului, în el păstrându-se o mare parte din substanțele nutritive necesare plantelor (a căror calitate se poate mări prin îngrășăminte organice).

Din punct de vedere chimic solurile conțin practic toate elementele chimice cunoscute, dar în proporții care diferă de la un tip de sol la altul, în funcție de originea lor.

În afară de substanțe minerale și organice, solurile conțin aer și apă care au o foarte mare influență asupra compoziției chimice și a morfologiei lor.

□ Apa este provenită din precipitații, iar în drumul ei prin sol dizolvă anumite substanțe, facilitează o serie de reacții chimice în sol, determină mineralizarea acestuia, migrarea elementelor chimice (și a izotopilor radioactivi) și viteza de asimilare a acestora de către plante. Încărcată cu substanțele provenite prin dizolvare, apa devine o soluție din care plantele absorb substanțele nutritive (este o sursă directă de alimentare).

□ Aerul este provenit din atmosferă, dar proporția de bioxid de carbon este mai mare aici, datorită proceselor de descompunere a materiei organice. Aerul este absolut necesar respirației rădăcinilor, încolțirii semințelor și proceselor microbiologice. Porozitatea solului asigură circulația aerului în sol.

Scoarța de alterare, ca și vegetația, diferă în funcție de climă și de relief. Solul, ca produs al acestora (interacțiunea dintre rocă, climă, vegetație și relief într-o lungă perioadă de timp) va îmbrăca diferite forme în funcție de zonalitatea climatică și de etajarea reliefului.

Tipul de sol poate fi influențat și de factori locali ai mediului: roca, panta, pânza freatică, etc. Influența climei asupra solului este, de asemenea, extrem de complexă. Structura morfologică și compoziția chimică a solurilor au caracteristici zonale corelate cu zonele climaterice.

Astfel, în zonele reci predomină solurile mlăștinoase, în zonele cu climă temperată predomină solurile podzolice (cu cenusă), în zonele de stepă solurile cu cernoziom, iar în zonele ecuatoriale și subecuatoriale se găsesc lateritele.

Compoziția chimică precum și alte proprietăți ale solurilor, ca formațiuni afânate, seamănă cu cele ale rocilor sedimentare (nisipo-argiloase).

1.7. VIAȚA PE PĂMÂNT

Viața pe Pământ se prezintă sub forma unor organisme cu grade de complexitate foarte diferite. Fiecare organism viu este un sistem bine organizat de celule vii, specializate pe diferite funcții: celule radiculare (absorb apa și sărurile din sol), celulele frunzelor verzi (asimilează bioxidul de carbon din aer), celule musculare (produc mișcarea), celule nervoase, celule digestive, celule de reproducere, etc. Celulele responsabile de procesele metabolice pe care le și controlează (mișcarea, respirația, creșterea și reacția la schimbările de mediu) se numesc **celule somatice**. Celulele care controlează reproducerea se numesc **celule genetice**. Există însă și organisme vii rudimentare, în care nu apare nici o diferențiere a celulelor (de exemplu, la corali), după cum există și organisme unicelulare (alge verzi, amibo, unele tipuri de bacterii, etc.).

Celula este de fapt **unitatea de bază** a lumii vii, ea fiind primul sistem cu adevărat biologic care prezintă toate caracteristicile viului. Celula ca sistem biologic are un caracter istoric: mai întâi au apărut celulele **procarlote** (în urmă cu 3,5 miliarde de ani) și apoi au apărut celule mai evolute numite **eucarlote** (în urma cu 1,5 miliarde de ani). Intreaga evoluție a plantelor și animalelor a început de la organismele unicelulare.

Principalele caracteristici ale unei celule sunt:

- din punct de vedere termodinamic este un **sistem deschis**: schimbă permanent energie, substanță și informație cu mediul extern;

- starea de *echilibru dinamic* (stare staționară) bazată pe comportarea antientropică a celulei: creșterea entropiei, specifică evoluției sistemelor nebiologice, la celulă este compensată (stopată) cu ajutorul surselor exterioare de energie;

- *caracterul informațional*: în orice moment, celula recepționează, prelucrează și transmite informații controlate și reglate permanent prin retroacțiuni (feedback), fiind similară unui sistem cibernetic care are la bază codul genetic;

- celula își asigură *autoconservarea* pe baza a trei tipuri de programe:

- ◆ programul “pentru sine” care asigură conservarea celulei ca un întreg
- ◆ programe inferioare pentru subsistemele componente
- ◆ programe superioare pentru sistemul superior în care este integrată celula

- *autoreglarea*: controlul proceselor interioare în funcție de relațiile cu mediul

Din punct de vedere morfologic, celula este formată din : *membrane, citoplasma și organele celulare* (nucleu, mitocondrii, reticuli endoplasmatici, ribozomi, etc) ca în figura 1.8.

Membranele. O celulă conține mai multe tipuri de membrane, formate în esență din proteine și lipide, cu proprietăți caracteristice de permeabilitate selectivă prin care se realizează compartimentarea materiei vii. Membranele (sau biomembranele) intervin direct în metabolismul celulei pentru că: în membrane au loc procesele de conversie a energiei (ex. conversia energiei luminoase în energie chimică sau fotosinteza); controlează fluxul de informații între celulă și mediul înconjurător; au rol important în procesele de apărare ale celulei (imunitatea celulară).

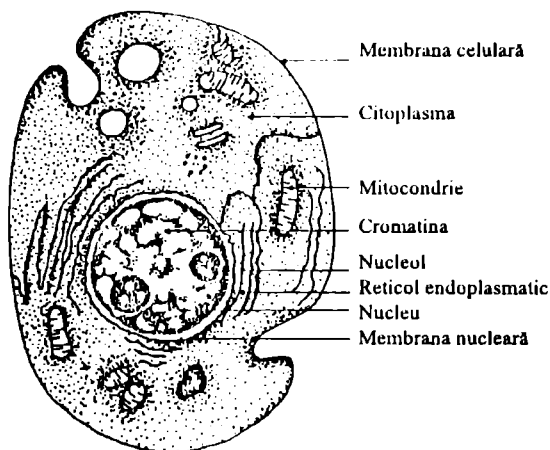


Figura 1.8: Structura unei celule

Citoplasma este mediul intracelular, format în esență din proteine, în care se desfășoară principalele activități metabolice și se schimbă mereu în timp și spațiu datorită fenomenelor fizice și chimice care au loc în ea. Aici au loc fenomene fiziologice ca: nutriția, creșterea, înmulțirea, semipermeabilitatea relativă și selectivă (după necesitățile fiziologice), cu autoreglare sub acțiunea diferiților stimuli.

Nucleul la eucariote este format din: *membrana nucleară, cromatina nucleară* (formată din filamente de ADN complexat cu proteine histone), *nucleoli* (ADN 3%, ARN 7%, proteine 90%). Cromatina se poate afla fie în stare relaxată (în perioada de pauză a celulei între două

diviziuni celulare), fie organizată în structuri condensate numite **cromozomi** care la o anumită specie apar în număr constant și au forme și mărimi caracteristice. Cromozomii conțin majoritatea materialului genetic al celulei (gene), fiind vehicule pentru stocarea, transmiterea, exprimarea și evoluția informației genetice.

Mitocondriile sunt organe specializate în producerea energiei necesară activităților celulare. Ele sunt similare unor microcentrale energetice în care energia eliberată prin oxidarea unor substanțe chimice este transformată în energie chimică. Toate celulele eucariote au mitocondrii, iar celulele vegetale au în plus și un alt tip de centrale energetice numite **cloroplaste** care captează și transformă energia luminoasă în energie chimică (fotosinteza)

Reticulii endoplasmatici sunt membrane organizate în structuri de tipul “tuburi și cisterne” care reprezintă de fapt un sistem circulator intracitoplasmatic prin care se transportă o mare parte din substanțe în întreaga celulă. Ei formează pe de o parte “structura de rezistență” a celulei, iar pe de altă parte este “fabrica de membrane” a celulei eucariote.

Ribozomii sunt formați din ARN și proteine (în raportul 3:2) și sunt asimilați cu “uzine” de fabricare a proteinelor

La celulele procariote nucleul nu este diferențiat: materialul nuclear este format dintr-o moleculă de ADN de forma circulară care formează singurul cromozom al celulei și este răspândit în citoplasmă.

Celulele se reproduc în țesut prin procese specifice în una din cele două variante posibile: “mitoza celulară” sau “mioza celulară”.

Compoziția biochimică a celulelor. Substanțele chimice din compoziția celulelor sunt anorganice (apa și sărurile minerale) și organice (proteine, glucide, lipide, acizi nucleici, etc) și se află în proporții care variază cu specia, cu tipul de celulă și starea ei funcțională, cu vârsta organismului, etc. În celulele majorității organismelor vii proporțiile sunt: apa (70%), proteine (15%), acizi nucleici (7%), glucide și metaboliții lor (3%), lipide și metaboliții lor (2%), ioni anorganici (1%), aminoacizi liberi și metaboliții lor (0,8%), alte molecule organice ca vitaminele, peptidele, etc (0,4%).

Întrucât efectele radiațiilor nucleare sunt mai pregnante la nivelul proteinelor și acizilor nucleici, în cele ce urmează vor fi prezentate câteva noțiuni generale despre aceste componente celulare. Proteinele și acizii nucleici sunt molecule care au un rol esențial în structura organismelor vii și conțin un număr impresionant de atomi, chiar de ordinul milioane (molecule foarte complexe). Aceste molecule complexe au în structura lor unități mai simple, înălțuite într-o anumită ordine, specifică fiecărui tip de moleculă în parte.

Proteinele

Proteinele sunt moleculele care contribuie cel mai mult la alcătuirea organismelor vii, dar nu există în oase sau în grăsimi. Unitățile de bază care intră în structura proteinelor sunt molecule simple compuse din carbon, azot, oxigen, hidrogen, și se numesc nucleotide. Formulele structurale ale nucleotidelor sunt date în fig. 1.9, în care este desenat punctul modul de cuplare a unităților de bază în lanțurile proteinelor (guanina cu citozina au trei legături, iar adenina cu uracilul au două legături) prin punți de hidrogen.

Din combinarea acestor patru unități de bază în triplete, se obțin douăzeci de aminoacizi diferiți care sunt încorporați în moleculele de proteine (tabelul 1.1).

Tabelul 1.1 Codul genetic

Aminoacid	Triplet	Aminoacid	Triplet
Fenilalanină	UUU	Izoleucină	UUA
Alanină	UCG	Leucină	UUC/UUG/UUA
Arginină	UCG	Lizină	UAA
Acid aspartic	UAG	Metionină	UAG
Asparagină	UAA/UAC	Prolină	UCC
Cisteină	UUG	Serină	UUC
Acid glutamic	UAG	Treonină	UAC/UCC
Glicină	UGC	Triptofan	UGC
Histidină	UAC	Tirozină	UUA
Glutamină	UCG	Valină	UUG

O moleculă de proteină privită la microscopul electronic apare ca o structură de fire lungi și subțiri, fire care sunt de fapt formate din lanțuri cu un număr foarte mare de aminoacizi. Ordinea în care sunt așezați aminoacizii în lanțurile moleculare determină funcția respectivei proteine, schimbări foarte mici ale acestui aranjament modificând drastic activitatea proteinei.

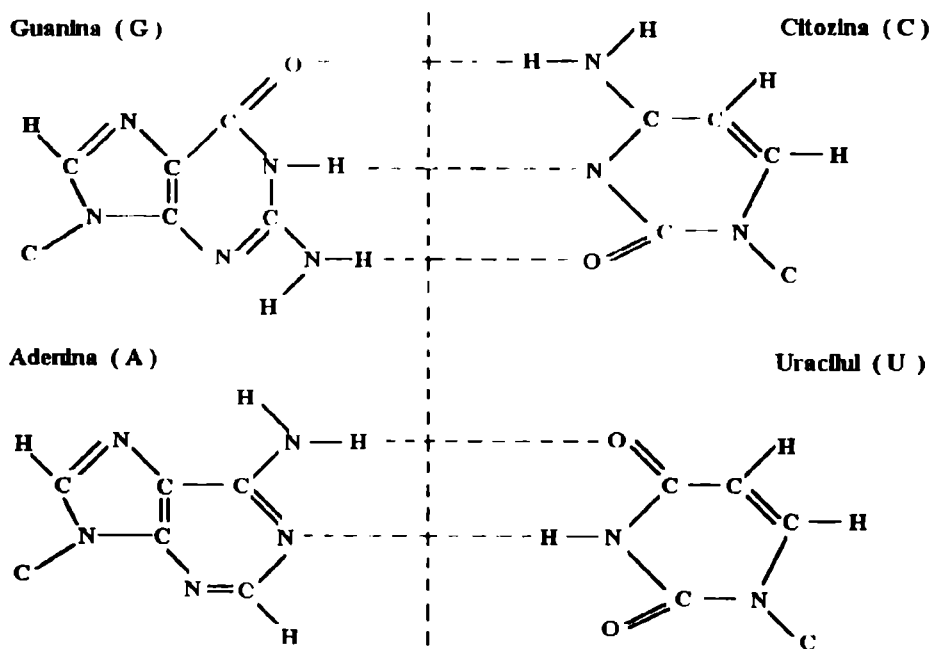


Figura 1.9: Structura nucleotidelor

Acizii nucleici

Moleculele de acizi nucleici reprezintă o fracțiune foarte mică din volumul organismului viu. Rolul acizilor nucleici este însă foarte important pentru viață: ei formează cromozomii și asigură transmiterea caracterelor ereditare ale organismelor. Văzuți la

microscopul electronic, acizii nucleici arată ca și proteinele: niște fire lungi, întortocheate, dar ceva mai groase. În structura lor intervin doar patru unități de bază (nucleotide). Există două grupe de bază de acizi nucleici:

a) **Acidul dezoxiribonucleic (ADN)** este un polimer dublu catenar de deoxiribonucleotide și conține guanina (G), adenina (A), citozina (C), și timina (T). În fig.1.10 este arătat modul de cuplare al catenelor de nucleotide prin punți duble și triple de hidrogen și legături fosfatice, iar în fig.1.11 formarea structurii dublu spiralate a ADN-ului. Se vede că și aici există o preferință a adeninei (A) pentru timina (T) și a guaninei (G) pentru citozina (C) în formarea cuplajului dintre cele două lanțuri de polimeri.

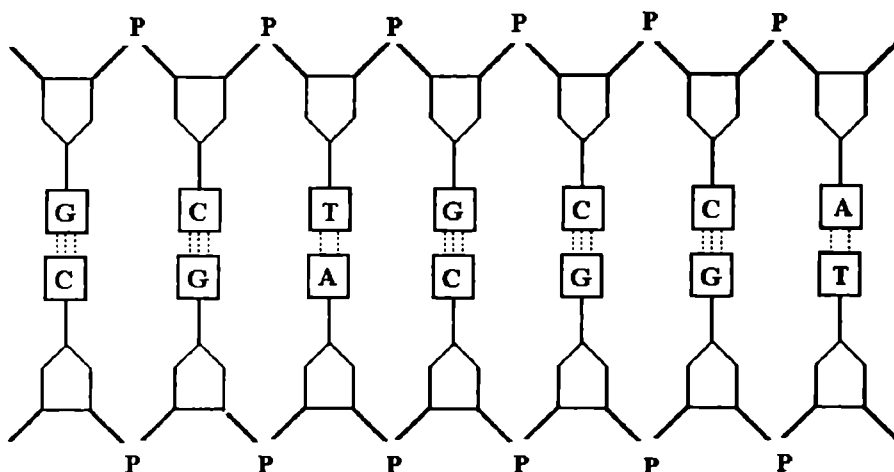


Figura 1.10: Catene de nucleotide, cu legături fosfatice și punți duble sau triple de hidrogen în ADN

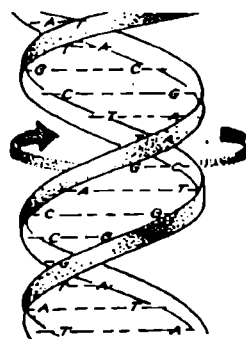


Figura 1.11: Structura dublu elicoidală a acidului dezoxiribonucleic (ADN)

Molecula de acid dezoxiribonucleic este, de fapt, o simplă repetiție monotonă a diferitelor perechi de nucleotide și ordinea în care se succed diferitele perechi determină toate proprietățile organismului din care fac parte acestea.

Structura cu dublă legătură a moleculelor de acid dezoxiribonucleic este absolut necesară procesului de diviziune celulară și de perpetuare a speciilor. Înainte ca o celulă să se dividă, fiecare moleculă de acid cu dublă legătură, se desface în două molecule cu legătură simplă, așa cum se observă în fig. 1.12.

Acastă diviziune este urmată de regenerarea moleculelor cu legături duble prin captarea de nucleotide libere, abundente în acel moment în fluidul nuclear (fig.1.12 și 1.13).

Deoarece guanina (G) captează numai citozina (C) și invers, iar timina (T) captează adenina (A) și reciproc, cele două molecule-fiice cu dublă legătură regenerate sunt identice cu molecula inițială (molecula-mamă).

În ceea ce privește ARN-ul, el joacă un rol important în sinteza proteinelor: proteinele sunt sintetizate în organism strict după instrucțiunile continute în moleculele de ARN, iar moleculele de ARN au structura strict determinată de ADN. Orice „greșală” în reproducerea unei molecule de acid dezoxiribonucleic, înseamnă apariția unui alt tip de acid (care apoi se multiplică). Apariția unui alt tip de acid înseamnă modificarea codului genetic, iar fenomenul, numit și **mutație genetică**, duce la apariția unui organism modificat, cu alte proprietăți decât cele inițiale.

Creșterea și reproducerea unei celule este guvernată de reacții biochimice care cuprind foarte multe molecule complexe. Defectarea moleculelor implicate în aceste procese poate altera funcționarea unei celule, conducând la una din variantele:

- ☐ moartea celulei și eliminarea ei din procesul vieții;
- ☐ imposibilitatea celulei de a se reproduce, deci posibilitatea morții ei;
- ☐ celula se poate divide, dar funcția noii celule este alterată (apar mutații).

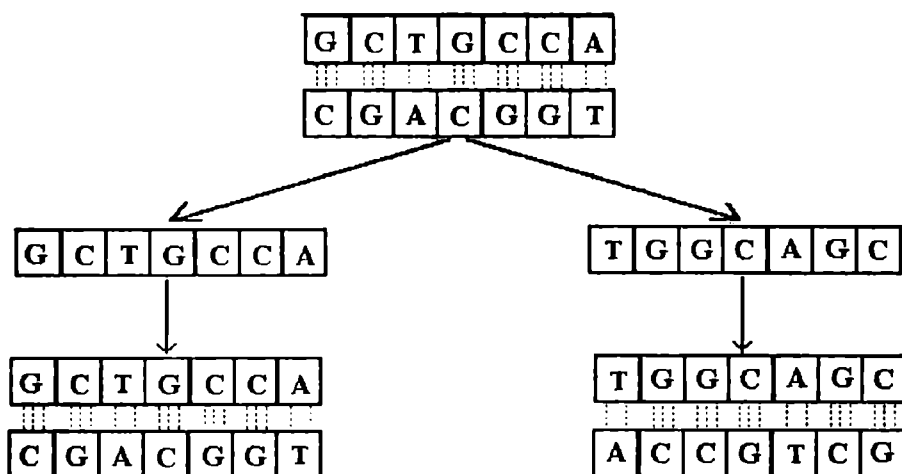


Fig.1.12 Replicarea unei molecule de ADN

b) **Acidul ribonucleic (ARN)** este un polimer monocatenar de ribonucleotide și are în structură sa cele patru nucleotide întâlnite și la proteine: adenina, guanina, citozina și uracilul (A, G, C, U). ARN-ul este de 3 tipuri: **ARN_m** care duce informația genetică de la nucleu la citoplasmă, **ARN_t** care activează aminoacizii și-i transportă la ribozomi și **ARN_r** care intră în structura ribozomilor. Cele mai simple organisme vii, cele celulare, cum sunt virusurile, virozii și plasmidele, au materialul genetic reprezentat de molecule de ARN, în timp ce la marea majoritate a organismelor actuale informația genetică este codificată în cadrul ADN-ului.

Virusurile actuale au gene de o mărime limitată și un program genetic alcătuit dintr-o secvență care, în medie, nu depășește $8.000 \div 10.000$ nucleotide. Aceste organisme foarte simple se pot autoreplica numai în interiorul unei nișe ecologice și anume în celula gazdă.

Replicația ARN-ului se realizează pe baza afinității dintre nucleotidele G și C pe de o parte, și a celei dintre A și U pe de altă parte. Nucleotidele G, C, U, A din catena ARN-ului atrag spre ele nucleotidele pentru care au afinitate și care se găsesc în stare liberă în celula care le-a sintetizat (fig.1.14).

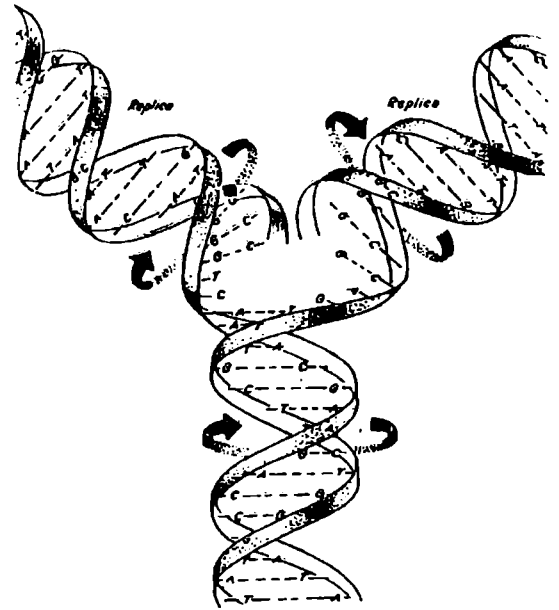


Figura 1.13 Formarea a doua lanțuri de tip spirală dublă la replicarea ADN-ului.

Replicația ARN-ului se face cu multe greșeli, adică cu nucleotide greșit introduse în macromoleculă (din o mie de nucleotide din macromolecula ARN-ului replică sunt introduse greșit $1 \div 10$ nucleotide).

În macromolecula ARN-ului nu există un aparat enzimatic care să repare greșelile, astfel că acestea se păstrează. Datorită acestor erori, genomurile de tip ARN au o mare variabilitate genetică.

Cu cât lanțul ARN este mai mare, cu atât șansa de replicare cu erori este mai mare, iar stabilitatea ARN-ului este mai mică

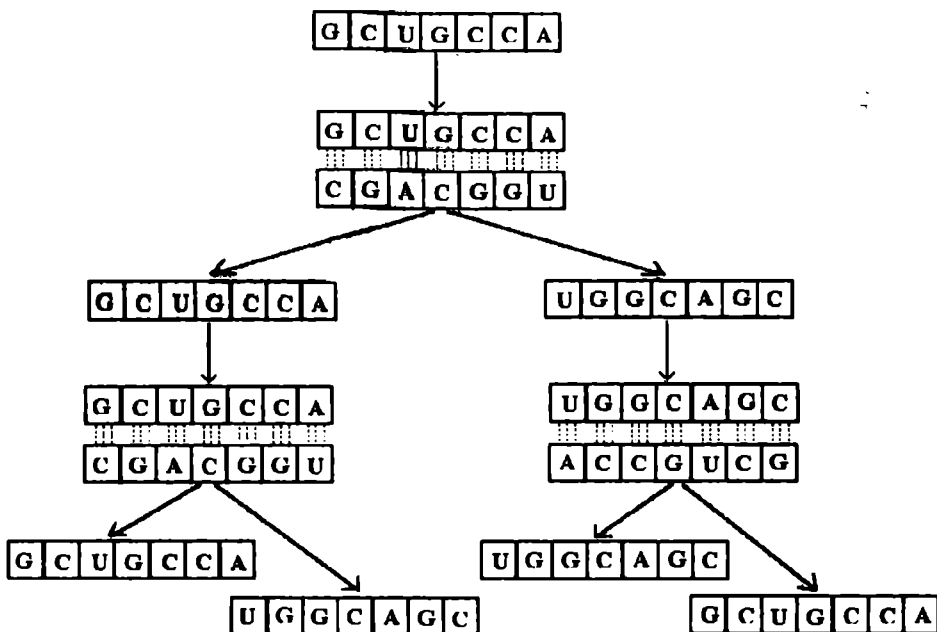


Figura 1.14 Replicarea unei molecule de ARN

În ceea ce privește ADN-ul, acesta îndeplinește două funcții importante în celulele organismelor vii:

a) *funcția de replicare* - în sensul că molecula de ADN are capacitatea de a se reproduce și de a da naștere unor molecule-fiice identice (au aceeași cantitate de ADN și același număr de cromozomi) - mecanism prin care se transmite informația ereditară de la celula-mamă la celulele-fiice;

b) *funcția de înregistrare a informației genetice* prin care moleculele de ADN determină sinteza unor proteine și enzime specifice, necesare structurilor și metabolismului celular; genele conțin programul acestor proteine.

Macromolecula ADN-ului are, spre deosebire de ARN, o structură cu două catene de nucleotide, ca în fig. 1.10, și care se desfășoară spațial în formă dubluspălată. Caracterul bicatenar al ADN-ului îi conferă acestuia o stabilitate mult mai mare, iar lanțurile de ADN sunt cu mult mai mari decât cele de ARN. Macromoleculele de tip ADN reprezintă materialul genetic pentru marea majoritate a ființelor vii actuale. Genele de tip ADN au dimensiuni mult mai mari decât genele formate din ARN și au capacitatea de a stoca o cantitate de informație mult mai mare. Genele și genomurile de tip ADN conțin milioane de nucleotide, cu secvențe precise de perechi de nucleotide.

Aceste proprietăți deosebite ale macromoleculelor de ADN sunt asigurate de existența unui mecanism foarte eficient de detectare și corectare a erorilor de replicare. Acest mecanism este constituit din enzime de tip polimeraze, care asigură replicarea ADN-ului, cu o mare fidelitate.

Legătura dintre informația genetică din macromoleculele acizilor nucleici și proteine se face mediat de codul genetic. O anumită secvență de trei nucleotide din ADN, denumită „codon”, codifică prezența unui anumit aminoacid în molecula proteică. Există astfel o corelare strictă între secvența de nucleotide din acizii nucleici și secvența de aminoacizi din proteine, fenomen numit *colinearitate*.

Este foarte interesant de menționat caracterul universal al codului genetic: toate formele de viață, de la cele mai simple până la cele mai complexe, incluzând omul, folosesc același cod genetic pentru înregistrarea informației genetice.

În concepția actuală se consideră că viața a apărut în momentul sintezei abiogene a primelor gene și a constituirii unui program genetic a cărui existență este legată de acizii nucleici care au posibilități nelimitate de înregistrare codificată a informației genetice [ref. 16].

De la o generație la alta se transmite programul genetic înscris în cromozomii fiecărei specii, prin care sunt determinate structura, funcțiile și arhitectura viitorului organism.

Materia vie de pe Pământ este organizată în sisteme biologice de diferite categorii în funcție de gradul de complexitate și de elementele componente. Un sistem biologic este definit ca un ansamblu de unități identice sau diferite, care formează un întreg datorită conexiunilor dintre ele.

Un astfel de sistem biologic este un sistem deschis, informațional, cu capacitate de autoconservare, reproducere, autoreglare, autodezvoltare [ref. 16].

Aceste caracteristici sunt determinate genetic. Posibilitatea de evoluție a sistemelor biologice se bazează pe îmbogățirea programelor genetice cu noi informații, prin procesul mutațional și pe recombinarea acestor informații, în special prin procesul sexual.

În perioada actuală, viața este organizată pe sisteme celulare. Se estimează că în corpul uman există în medie aproximativ 10^{11} celule, grupate în peste 150 de tipuri de celule umane,

diferite prin mărimea lor, structură și funcții: celule musculare, sanguine, nervoase, hepatice, etc. Toate aceste celule provin dintr-o singură celulă inițială, celula-ou, rezultată în urma fecundării.

Radiațiile nucleare provenite de la surse naturale sau artificiale și care interacționează cu substanța vie produc modificări în însăși structura intimă a celulelor vii iradiate. Efectul iradierii la nivelul întregului organism depinde de tipul și numărul celulelor afectate, de ritmul în care s-a produs lezarea lor după cum se va vedea în capitolele următoare.

1.8. BIOSFERA

Structura morfologică primară a Pământului a fost permanent supusă transformărilor, datorită proceselor care au loc atât în interiorul, cât și la suprafața lui, transformări care au dus la formarea atmosferei, hidrosferei, pedosferei, dar și a biosferei.

Biosfera este definită ca fiind spațiul din zona planetei noastre în care are loc biogeneza. S-a estimat că biosfera este o pătură aproximativ sferică, cuprinsă între altitudinea de 5 km și adâncimea de 3 km. Acest strat, cu grosimea de aproximativ 8 km, cuprinde în structura sa, pe lângă componenta biologică, și părți din atmosferă, hidrosferă și litosferă care formează împreună mediul în care organismele vii se nasc, trăiesc și mor. Între aceste componente ale mediului există puternice interdependențe și orice modificare locală sau globală a uneia dintre componente se reflectă, direct sau indirect, imediat sau în timp, mai mult sau mai puțin, asupra celorlalte componente.

Componenta biologică are la rândul ei o substructură corelată cu gradul de complexitate a organismelor vii, cu mediul lor de viață, etc.

Important pentru problema care ne interesează este faptul că până și organismele vii cu cea mai simplă structură sunt implicate în procese de schimb cu mediul în care trăiesc. Pentru orice individ al unei specii, mediul de viață este format din tot ceea ce îl înconjoară și îi creează sau influențează condițiile de existență și de evoluție.

Omul, organismul viu cel mai complex care există pe Pământ, a apărut și a evoluat în condițiile de mediu existente pe această planetă, condiții aflate în permanentă modificare (schimbare), uneori lentă și calmă, alteori violentă și distrugătoare, modificări periodice (zi, noapte, anotimpuri) sau imprevizibile (glaciațiuni, cutremure, inundații, etc.), purtând asupra sa amprenta mediului în care s-a dezvoltat.

Dar, la rândul său, mediul înconjurător este marcat de prezența și activitatea omului (ca de altfel și de existența altor organisme vii). Aceste influențe sunt benefice sau distrugătoare pentru mediu și prin circuite de feed-back se reflectă asupra vieții omului pe Pământ. De aici decurge necesitatea de armonizare a omului cu mediul, de ocrotire a mediului și a celorlalte organisme vii cu acțiune benefică asupra acestuia și de păstrare a echilibrului ecologic local și global pe planeta noastră.

CAPITOLUL 2

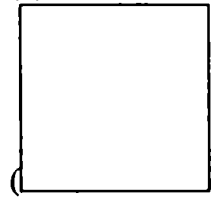
RADIOACTIVITATE ȘI RADIAȚII

2.1. DEZINTEGRAREA NUCLEARĂ ȘI A PARTICULELOR ELEMENTARE CA SURSĂ DE RADIAȚII

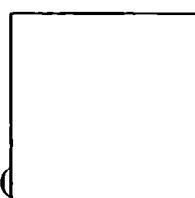
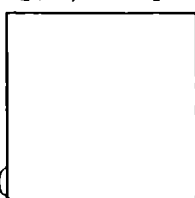
Prin radioactivitate se înțelege proprietatea unor nuclizi, numiți nuclizi radioactivi, de a emite în mod spontan (fără intervenția activității umane), diferite tipuri de particule (ca de exemplu: fotoni, electroni, neutrini, nuclee de heliu, etc.) reunite sub denumirea de radiații.

Fenomenul de „radioactivitate” este strâns legat de fenomenul de „dezintegrare” specific lumii subatomice, fiind de fapt o consecință directă a acestuia. Cauza radioactivității trebuie căutată în tendința naturală a oricărui sistem cuantic de a trece în starea de energie minimă posibilă, pe orice cale permisă de legile de conservare, fiecare cale fiind, de fapt, „un mod de dezintegrare”. Orice particulă X (nucleu sau particulă elementară) de masă m_x , aflată în repaos, cu energia totală egală cu energia de repaos înmagazinată în masa sa, va avea tendința de a se dezintegra trecând în particule cu mase mai mici. Dezintegrarea poate avea loc dacă există într-adevăr particule cu mase mai mici decât masa m_x și dacă legile de conservare a energiei, sarcinilor (electrică, barionică și leptonică), momentului cinetic, etc., permit această transformare.

Numărul tipurilor de particule elementare cunoscute la ora actuală depășește numărul elementelor chimice din tabelul lui Mendeleev, dar singurele particule stabile sunt: neutrinul (ν), electronul (e^-), fotonul (γ), protonul (p) și antiparticulele asociate lor: antineutrिनul



(), pozitronul (e^+), fotonul () și antiprotonul ().



Ele sunt, de fapt, cele mai ușoare particule din categoriile: fermioni - leptoni (e , ν), fermioni - barioni (p) și bozoni (γ). Legile de conservare interzic dezintegrarea acestora în particule mai ușoare.

Toate celelalte tipuri de particule elementare sunt instabile și orice particulă elementară instabilă va trece, printr-un șir de dezintegrări în lanț sau printr-un proces unic de dezintegrare, într-o stare finală formată din particule stabile, libere, de tip: γ , ν , e , p . Iată câteva exemple:

a) Neutronul (n) are un mod unic de dezintegrare, trecând direct în trei particule stabile:

apoi

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu} (\nu_{\mu}) \quad (2.1.4)$$

c) Mezonii π^0 (neutri din punct de vedere electric) trec direct în fotoni:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (2.1.5)$$

d) Barionii Λ^0 suferă diverse dezintegrări, pe căi diferite:

$$\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p; \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}; \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_e \quad (2.1.6)$$

sau:

$$\Lambda^0 \rightarrow \pi^0 + n; \quad \pi^0 \rightarrow 2\gamma; \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.1.7)$$

Fiecare act de dezintegrare este caracterizat de o energie de dezintegrare Q_{dez} , eliberată sub formă de energie cinetică sau electromagnetică a particulelor rezultate din dezintegrare și egală cu diferența dintre masa m_{x_i} a particulei „părinte” și suma maselor m_j ale particulelor „fiice”, exprimate în unități energetice ($E=mc^2$)

$$Q = (m_{x_i} - \sum m_j) \cdot c^2 \quad (2.1.8)$$

În mod similar, din cele aproximativ 1500 de tipuri de nuclee (nuclizi) identificate experimental, marea lor majoritate sunt nuclee instabile care, pe o cale sau alta permise de legile de conservare, se transformă în nuclee mai stabile. Orice astfel de transformare este o dezintegrare radioactivă: nucleul-părinte emite particule elementare sau grupări de nucleoni sub formă de fragmente nucleare și își modifică structura neutro-protonică (N, Z), numărul de nucleoni (A), masa ($m(Z, A)$) și energia totală, intrinsecă, în funcție de tipul de dezintegrare.

Gradul de instabilitate al unui nucleu într-o stare dată este exprimat prin „durata medie de viață τ ” sau prin probabilitatea de dezintegrare în unitatea de timp, care este o mărime constantă în timp (constanta de dezintegrare $\lambda = 1/\tau$).

Nucleul - fiică poate, la rândul său, să se transforme mai departe (dacă legile de conservare îi permit), printr-o serie de dezintegrări în lanț, până la un nucleu stabil, cu masa considerabil mai mică.

În natură, există aproape pentru fiecare număr de masă $A < 250$, cel puțin un izobar stabil, astfel că, numărul de specii nucleare stabile este relativ mare (~ 200), față de numărul de tipuri de particule elementare stabile (4).

Ca și în cazul particulelor, în orice act de dezintegrare nucleară se eliberează o cantitate de energie Q_{dez} sub formă de energie electromagnetică sau cinetică.

Cele mai frecvente tipuri de transformare nucleară spontană sunt:

- ☐ dezintegrarea α (emisie de nuclee de heliu);
- ☐ dezintegrarea β (emisie de e^- , $\bar{\nu}_e$ sau e^+ , ν_e și captura electronică CE);
- ☐ fisiunea spontană (SF);
- ☐ emisia γ ;
- ☐ conversia internă (CI).

De regulă, dezintegrările nucleare modifică până și tipul speciei nucleare inițiale (dezintegrare α , dezintegrare β , fisiune, etc.) după cum se observă din relațiile (2.1.9) - (2.1.13):

■ **Dezintegrarea α :**

$${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2 \text{He} (\alpha) + {}^{A-4}_{Z-2} Y; Q_\alpha = (m_X - m_Y - m_{He}).c^2 \quad (2.1.9)$$

■ **Dezintegrarea β^- :**

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e; Q_{\beta^-} = (m_X - m_Y - m_e - m_{\bar{\nu}}).c^2 \quad (2.1.10)$$

■ **Dezintegrarea β^+ :**

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e; Q_{\beta^+} = (m_X - m_Y - m_e - m_{\nu}).c^2 \quad (2.1.11)$$

■ **Captura electronică (CE):**

$${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e; Q_{CE} = (m_X + m_e - m_Y - m_{\nu}).c^2 \quad (2.1.12)$$

■ **Fisiunea nucleară (binară):**

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1} Y_1 + {}^{A_2}_{Z_2} Y_2; Q_{SF} = (m_X - m_{Y_1} - m_{Y_2}).c^2 \quad (2.1.13)$$

unde:

$$A = A_1 + A_2 \quad Z = Z_1 + Z_2$$

În cazul emisiei γ și a conversiei interne (CI), nucleul efectuează tranziții energetice fără a-și pierde identitatea inițială, așa cum arată și formula (2.1.14):

■ **Emisia γ :**

$${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma (e_{CI}) \quad (2.1.14)$$

unde steluța * indică o stare excitată a nucleului X, iar e_{CI} indică varianta concurentă la emisia γ , de expulzare a unui electron atomic prin conversia internă (CI) a energiei nucleare de excitare în energie cinetică a unui electron atomic.

În expresiile energiilor de dezintegrare din relațiile (2.1.9) - (2.1.14), m_X , m_Y , m_{Y_1} , m_{Y_2} sunt masele nucleare. Dacă se introduc masele atomice în aceste formule, ($M(Z, A) = m(Z, A) + Z m_e$) și se neglijează masele neutrinilor, atunci energiile de dezintegrare sunt:

$$Q_\alpha = (M_X - M_Y - M_{He}).c^2 \quad (2.1.15)$$

$$Q_{\beta^-} = (M_X - M_Y).c^2 \quad (2.1.16)$$

$$Q_{\beta^+} = (M_X - M_Y - 2m_e).c^2 \quad (2.1.17)$$

$$Q_{CE} = (M_X - M_Y).c^2 \quad (2.1.18)$$

$$Q_{SF} = (M_X - M_{Y_1} - M_{Y_2}).c^2 \quad (2.1.19)$$

În expresia maselor atomice a fost neglijată energia de legătură a acestora care, în acest context este într-adevar neglijabilă.

Radiațiile emise: α , ν , γ , e^\pm , preiau cea mai mare parte a energiei de dezintegrare (energia cinetică sau electromagnetică), astfel că vor exista radiații cu energii de ordinul MeV-ilor (până în 10 MeV), în timp ce fragmentele de fisiune spontană Y_1 , Y_2 , cu mase comparabile, își împart energia în porții de asemenea comparabile (zeci de MeV).

2.2. LEGEA DEZINTEGRĂRII RADIOACTIVE

Legea dezintegrării radioactive arată evoluția în timp a probabilității $P(t)$ ca un nucleu creat la momentul $t = 0$ să rămână nedezintegrat până la un moment ulterior t . Deducerea legii de dezintegrare se bazează pe ipoteza (verificată experimental) că probabilitatea de dezintegrare λ în unitatea de timp rămâne constantă pe perioade de timp foarte lungi în comparație cu perioada de înjumătățire. Astfel, s-a obținut:

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t) \quad (2.2.1)$$

Fiecare nuclid radioactiv este caracterizat de propria sa constantă λ .

O sursă radioactivă este formată dintr-un număr foarte mare de atomi (nuclee) dintr-o specie radioactivă, aflați sau nu în combinații chimice cu alte elemente radioactive. Numărul de nuclee radioactive din sursă scade în timp, astfel că, dacă la un moment de referință ($t = 0$) în sursă erau N_0 nuclee radioactive, la un moment ulterior t , numărul de nuclee radioactive nedezintegrate $N(t)$ este:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.2.2)$$

Activitatea $\Lambda(t)$ a sursei este definită ca numărul de nuclee ce se dezintegrează în unitatea de timp:

$$\Lambda(t) \equiv \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N(t) = \Lambda_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.2.3)$$

unde :

$$\Lambda_0 = \lambda \cdot N_0 \quad (2.2.4)$$

Ea are ca unitate un Becquerel ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ dez/s}$) și ca unitate tolerată un Curie ($1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$)

Perioada de înjumătățire $T_{1/2}$ reprezintă timpul după care numărul de nuclee $N(t)$, deci și activitatea sursei $\Lambda(t)$, scade la jumătate, și e legată de λ prin relația:

$$N(t) = \frac{N_0}{2} \quad ; \quad \Lambda(t) = \frac{\Lambda_0}{2} \quad ; \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.2.5)$$

O probă radioactivă este un eșantion prelevat din mediul înconjurător (apă, aer, sol, rocă, precipitații, plante, animale, etc.) sau din produsele activității umane (materiale de construcții, îngrășăminte chimice, etc.) și care conține unul sau mai multe elemente radioactive (elemente chimice cu izotopi radioactivi) în compoziția sa, fiecare cu modurile sale de dezintegrare și de radiații emise. Activitatea totală a unei astfel de probe este egală cu suma activităților $\Lambda_i(t)$ ale speciilor radioactive din probă:

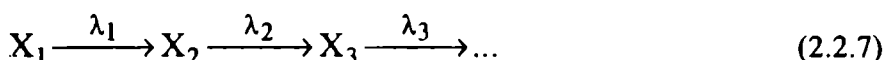
$$\Lambda_{\text{tot}}(t) = \sum_{i=1}^n \Lambda_i(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i(t) \quad (2.2.6)$$

unde λ_i este constanta de dezintegrare a speciei „i”, iar $N_i(t)$ este numărul de nuclee din specia izotopului radioactiv „i” existent în probă la momentul t .

Sunt destul de frecvente cazurile în care un nucleu suferă un șir de dezintegrări succesive, proces numit „dezintegrare în lanț”. Este cazul nucleelor izobare ($A = \text{constant}$), care trec dintr-un izobar în altul prin dezintegrări β^- succesive sau prin dezintegrări $CE + \beta^+$ succesive către izobarii stabili (unul sau doi) din familia izobarică respectivă (același A). Practic, pentru fiecare număr de masă A există dezintegrarea în lanț a izobarilor.

Sunt cunoscute, de asemenea, dezintegrările în lanț care formează cele trei serii radioactive naturale având capi de serie (nucleu-părinte) izotopii ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th sau seria radioactivă artificială a ^{237}Np . În aceste serii, alternează dezintegrările α cu β^- , trecând printr-un număr mai mare sau mai mic de descendenți ai nucleului-părinte, până la un nucleu final, stabil, de regulă izotop al plumbului (Pb).

Într-o probă care conține nuclizi ce se dezintegrează în lanț:



numărul $N_i(t)$ de nuclee din specia descendentă „ i ” este condiționat de viteza de formare prin dezintegrarea speciei părinte ($i - 1$) și de viteza proprie de dezintegrare spre specia fiică ($i + 1$):

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1} \cdot N_{i-1} - \lambda_i \cdot N_i \quad i \neq 1 \quad (2.2.8)$$

în timp ce $N_1(t)$ (specia părinte ($i = 1$)) scade cu viteza λ_1 , N_1 fără să fie realimentată:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1 \quad (2.2.9)$$

Numărul de nuclee existente în probă la momentul t este dat pentru nucleul-părinte de:

$$N_1(t) = N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} \quad (2.2.10)$$

iar pentru cei ($n - 1$) descendenți, în cazul particular în care $N_i(0) = 0$ pentru $i > 1$ (toți descendenții s-au format numai din dezintegrarea capului de serie !):

$$N_i(t) = N_{10} \left(a_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} + a_2 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} + \dots + a_n \cdot e^{-\lambda_n \cdot t} \right) \quad (2.2.11)$$

cu

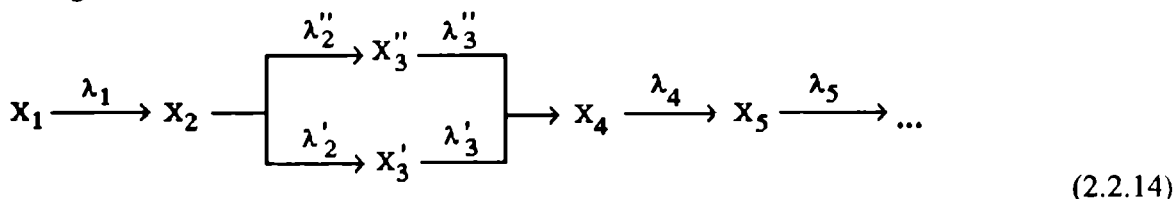
$$a_i = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \dots \cdot \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_i) \cdot (\lambda_2 - \lambda_i) \cdot (\lambda_3 - \lambda_i) \cdot \dots \cdot (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} = \frac{\prod_{j=1}^{i-1} \lambda_j}{\prod_{j=1, j \neq i}^i (\lambda_j - \lambda_i)} \quad (2.2.12)$$

Activitatea totală a probei care conține o asemenea serie radioactivă (izotopi radioactivi genetic corelați) este suma activităților fiecărei componente radioactive:

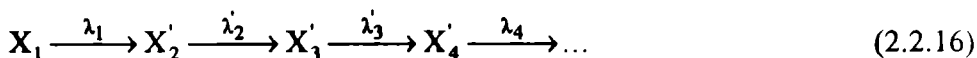
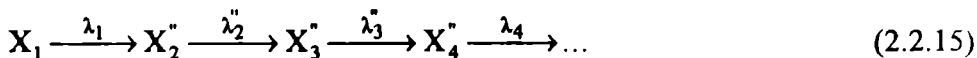
$$\Lambda_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \Lambda_i(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i(t) \quad (2.2.13)$$

similară formal cu relația (2.2.6), dar are o dependență mult mai complexă de constantele de dezintegrare λ_i decât în cazul amestecului de izotopi necorelați genetic, cum este cazul relației (2.2.6).

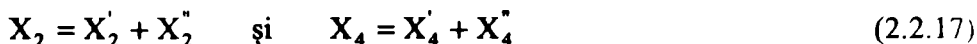
În seriile radioactive, există descendenți care formează ramificații în lanțuri de dezintegrare:



Evaluarea numărului de nuclee din fiecare specie se face urmărind fiecare ramificație separat:



cu



2.3. SURSE DE RADIAȚII

Sursele naturale de radiații sunt de două tipuri:

□ **Izotopi radioactivi naturali (IRN)** - aceștia se află în toate componentele mediului înconjurător. Unii IRN s-au format odată cu Pământul (de exemplu izotopii uraniului sau ai thoriului), fac parte integrantă din structura lui și au perioada de înjumătățire foarte mare, comparabilă sau chiar mult mai mare decât vârsta Pământului, așa explicându-se prezența lor în mediu. Alți izotopi radioactivi naturali au perioada de înjumătățire scurtă (de exemplu: izotopul de hidrogen cu $Z=1$ și $A=3$, izotopul de carbon cu $Z=6$ și $A=14$, etc.) și n-ar mai exista ca atare în mediu dacă nu s-ar forma continuu, în mod natural, cu o viteză aproximativ constantă în timp. Izotopii radioactivi naturali sunt surse naturale de radiații α , β sau γ .

□ **Radiația cosmică (RC)** - este o sursă naturală de radiații, de origine extraterestră. Prin convenție, sub denumirea de „raze cosmice” sunt incluse toate tipurile de particule de origine extraterestră, cu excepția radiațiilor electromagnetice (X , γ , fotoni luminoși, etc.). Radiația cosmică este formată din particule elementare de diferite tipuri, de energie foarte mare, care vin din toate direcțiile spațiului cosmic și „cad” ca un duș continuu pe Pământ. În afara particulelor elementare, cum sunt mezonii π , miuronii, neutrinii, etc., în radiația cosmică au fost identificate și nuclee ușoare (până în zona sulf - magneziu) care vin, de asemenea, cu energii foarte mari spre Pământ.

De la formarea sa, Pământul a fost continuu iradiat și a primit energie din spațiul cosmic prin aceste radiații cosmice. Viața pe Pământ a apărut și s-a dezvoltat în prezența acestor surse naturale de radiații, terestre și cosmice (care formează fondul natural de radiații), menținând în echilibru acțiunile lor benefice și distructive asupra organismelor vii.

Omul, prin activitatea sa, a modificat substanțial distribuția izotopilor radioactivi naturali pe Pământ, și, în consecință, fondul natural de radiații local. De asemenea, omul a creat noi surse de radiații - surse artificiale. În categoria surselor artificiale intră izotopii radioactivi produși de om prin ciocniri la nivel subatomic (reacții nucleare, în general, și reacții de fisiune nucleară indusă, în particular), dar s-au mai creat surse de radiații X și acceleratoare de particule. Aceste surse artificiale au o pondere globală mică în raport cu cele naturale, dar ele au modificat continuu, mai mult sau mai puțin controlat, fondul natural de radiații în diferite zone ale globului (explozii nucleare, accidente nucleare, etc.).

Impactul activității umane asupra acestor surse artificiale trebuie menținut la un nivel în care efectul benefic pentru om și mediu să justifice factorul de risc, iar acesta trebuie redus la minim.

CAPITOLUL 3

EFFECTUL RADIĂȚIILOR IONIZANTE ASUPRA SUBSTANȚEI VII

3.1. RADIAȚIA IONIZANTĂ

Radiațiile ionizante sunt formate din:

- ☐ particule cu sarcină electrică (e , p , α , π , etc.);
- ☐ particule neutre (n , Λ^0 , π^0 , etc.);
- ☐ fotoni X și γ (nu sunt incluse radiațiile infraroșii și ultraviolete).

Aceste radiații produc ionizări în mediul material pe care îl străbat, fapt pentru care se numesc „radiații ionizante”.

Ionizarea este provocată în general de interacția unei particule încărcate cu un electron (e^-) atomic sau molecular al mediului. Particulele cu sarcină sunt direct ionizante: ele interacționează coulombian cu electronii și are loc un transfer direct de energie de la particula incidentă la electron, în porții suficiente pentru a produce excitarea sau ionizarea acestora.

Fotonii pot deasemenea să producă ionizarea directă prin efect fotoelectric, dar și indirect prin efect Compton.. Fotonii, prin efect Compton sau fotoelectric, pun în mișcare un electron sau pot crea perechile e^+ și e^- care, mai departe își epuizează energia cinetică printr-un șir de ionizări (excitații) produse în lungul traiectoriei sale. Particulele neutre produc indirect ionizarea prin particulele secundare pe care le pun în mișcare sau le creează la interacția lor cu mediul. Particulele neutre se apropie de nuclee, nestingherite de interacția coulombiană, și interacționează cu acestea fie elastic, fie prin reacții nucleare. În acest caz, sunt puse în mișcare și particule cu sarcină mai mare (Ze) și mai masive decât electronul (protoni, nuclee sau fragmente nucleare) care au putere mare de ionizare.

Radiațiile ionizante interacționează cu substanța vie la fel ca și cu substanța fără viață, dar efectele finale sunt cu totul altele în cele două cazuri.

Evenimentele fizice inițiale (EFI) produse de radiație în materia vie declanșează un lanț de reacții fizico-chimice care ajung în final să deterioreze molecule mari, indispensabile vieții celulare și să producă efecte biologice..

Una din proprietățile cele mai importante ale diferitelor radiații ionizante este adâncimea de penetrare în țesut, care depinde de tipul și energia particulelor. Particulele α pătrund numai prin suprafața exterioară a pielii și radionuclizii α - emițători sunt periculoși numai dacă sunt încorporați în organism prin inhalare, ingestie sau rană deschisă. Radiațiile β pătrund circa un cm, ele fiind periculoase pentru țesuturile superficiale, nu și pentru organele interne, dacă iradierea se face din exterior. Dacă emițătorii β sunt încorporați în organe, atunci acestea vor fi afectate local sau extins, după distribuția surselor β în organism.

Razele X, γ și neutronii trec prin întregul corp, astfel încât produc efecte în profunzime, indiferent dacă iradierea este internă sau externă.

3.2. EVENIMENTE FIZICE ÎNȚIALE

Mediile biologice sunt constituite din atomi cu număr atomic mic (H, C, O, etc.) și interacțiunile cu particulele ionizante sunt, în principal, ciocniri cu electronii. După mărimea transferului energetic către electron, molecula căreia îi aparține poate fi ionizată, excitată, sau poate primi un supliment de energie termică. Energia cedată mediului nu este distribuită omogen: pentru radiațiile puternic ionizante ea este concentrată în zona imediat vecină traiectoriei particulei.

Dacă Q este energia primită de electron, iar W este energia sa de legătură în atom sau moleculă (câțiva eV ÷ zeci de eV), atunci se pot realiza următoarele situații:

a) $Q > W$: electronul este expulzat din atom cu energia cinetică $T_e = Q - W$. Dacă $T_e > 100$ eV, traiectoria electronului se detașează de traiectoria primară și este numit „electron delta” (δ). El va interacționa cu mediul, producând ionizări ca și particula primară. Dacă $T_e \sim 100$ eV, cele câteva ionizări produse de el sunt vecine și formează un „cluster” (ciorchine). Molecula ionizată devine instabilă și are o reactivitate chimică mare. Molecula de apă, care în mod obișnuit disociază în forma:



suferă prin iradiere fenomenul de radioliză, un fenomen foarte complex, format din mai multe etape ce vor fi prezentate separat.. Tot în acest caz poate avea loc și un transfer de sarcină:



unde B are un potențial de ionizare inferior.

b) $Q < W$: electronul sare pe un nivel energetic superior, molecula (atomul) este excitată, fapt care-i fragilizează legătura dintre atomi și duce la ruperea ei. În acest caz, poate avea loc transferul de energie de excitație:



și dacă energia de excitare a lui A este mai mare decât cea de ionizare a lui B, se poate ioniza B:



c) Q foarte mici: energia este insuficientă pentru ionizare sau excitare, se transformă în energie termică, ducând la creșterea vitezei de translație, rotație sau vibrație a moleculei.

Transferurile termice sunt fără consecințe: ar trebui doze de mai mulți Megarad pentru a avea o creștere de temperatură a mediului de câteva grade, susceptibilă a avea consecințe asupra biochimiei celulare.

3.3. PROCESE RADIOCHIMICE LA NIVEL CELULAR. RADIOLIZA APEI

Celula poate fi asemănată cu o soluție apoasă, iar radiația poate acționa în două variante:

□ *Acțiunea directă asupra moleculelor de solvat, care produce leziuni la nivelul acestora (excitări, ionizări)*

Chiar dacă numărul moleculelor atinse direct este mic, efectul direct are consecințe biologice importante când sunt atinse anumite molecule (enzime) sau anumite structuri intracelulare (gene, cromozomi, acid dezoxiribonucleic). Moleculele excitate sau ionizate au un excedent de energie care le face instabile. Surplusul de energie este eliberat fie prin emisia radiației de fluorescență (fotoni), cu revenirea la starea inițială, fie prin ruperea unei legături covalente (:) și scindarea moleculei în doi radicali liberi (cu câte un electron neîmperecheat) care au mare reactivitate chimică:



Punctul pus în dreapta sus indică prezența unui electron neîmperecheat în radical.

Sciziunea este mai probabilă după o ionizare și nu se face neapărat în punctul de legătură de unde a fost expulzat electronul: energia absorbită de moleculă de la radiație poate migra în interiorul acesteia și ruptura se produce la nivelul celei mai slabe legături. Energia absorbită poate fi transferată unei alte molecule, aceasta suportând aceleași consecințe ca și când ea ar fi fost atinsă direct.

Radicalii liberi interacționează între ei sau cu alte molecule, dând reacții de adiție:



Pe ansamblu, toate moleculele au revenit la o stare stabilă, dar anumite molecule au fost deteriorate, modificate chimic.

Se definește un „randament radiochimic” G al radiației pentru o specie chimică:

$$G = \frac{\text{număr molecule deteriorate}}{100 \text{ eV}} \quad (3.3.3)$$

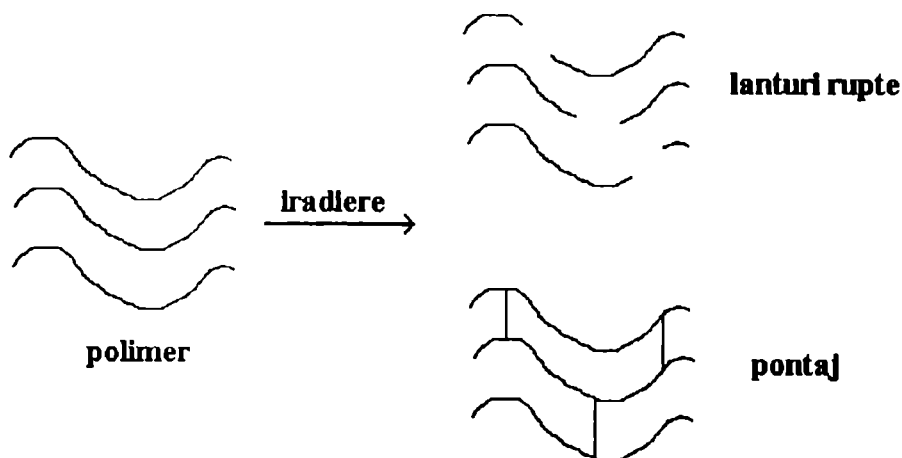


Figura 3.1: Efectul iradierii asupra lanțurilor polimerilor

Tipul de leziune depinde, adesea, de structura moleculei. În cazul polimerilor, de exemplu, lanțurile pot suferi rupturi sau polimerizări (pontaje):

□ **Acțiunea indirectă** - constă dintr-un efect direct (excitare sau ionizare) asupra solventului (apa) și produselor acestuia (radicalii HO, H) care acționează apoi asupra solvatului.

Apa reprezintă 80% din greutatea organismelor vii, iar la țesuturile tinere sau embrionare atinge chiar 90 ÷ 95 %, deci efectul indirect este important.

Radioliza apei

Într-o primă etapă, sub acțiunea radiațiilor, se formează o serie de ioni:



În etapa următoare, acești ioni formează perechi de radicali liberi H și OH:



În continuare, devin posibile o serie de alte reacții ale căror produse sunt H, O, H₂O₂. În final, din cauza recombinărilor diferite ce se produc, apare apa:



și:



și în final:



Se observă că sub acțiunea radiațiilor, se obține nu numai disocierea apei în diferite variante, dar și sinteza unor produși chimici noi, cum este apa oxigenată H₂O₂.

Pentru o moleculă organică $R : H$, se observă reacții diferite:

- de tip hidroxilare: $R : H + HO^\cdot \rightarrow R^\cdot + H_2O$

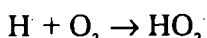


- de tip dehidrogenare: $R : H + H^\cdot \rightarrow R^\cdot + H_2 \quad (3.3.13)$

- sau de tip adiție: $R + R^\cdot \rightarrow R : R^\cdot \quad (3.3.14)$

Molecula de oxigen are rol de radiosensibilizator, deoarece în momentul iradierii oxigenul mărește efectul acesteia, formând radicali cu viață mai lungă decât HO^\cdot , care au timp să difuzeze. Prezența oxigenului poate avea ca efect:

□ captura radicalului H^\cdot și formarea HO_2^\cdot :



care este un oxidant puternic;

□ reacții în lanț cu formare de peroxizi:



Hiperoxizii și peroxizii sunt substanțe toxice care se acumulează în timpul iradierii.

Rezultă că o leziune se produce în doi timpi:

■ în prima fază, leziunea formată sub acțiunea directă a radiațiilor este reversibilă;

■ în a doua fază, molecula lezată reacționează cu O_2 sau cu alt radical liber și leziunea devine definitivă.

Radiațiile α au densitate mare de ionizare și formează în lungul traiectoriei o cantitate mare de ioni H_2O^+ și deci, conform ecuației (3.3.7), radicali OH^\cdot . Acești radicali au mare probabilitate de a se afla unul lângă celălalt, ceea ce mărește brusc randamentul primeia din reacțiile (3.3.11) de formare a apei oxigenate. Electronii ce apar la ionizarea primară sunt angstromipropulsați de particula α la distanțe de aproximativ 150 \AA de traiectoria ei și acolo sunt absorbiți formând ioni negativi H_2O^\cdot . Rezultatul dezintegrării acestor ioni este hidrogenul atomic și apoi hidrogenul molecular. Principala reacție de recombinare a apei ($H^\cdot + OH^\cdot$) nu are loc deoarece H^\cdot și OH^\cdot se formează în locuri diferite.

În schimb, sub acțiunea radiației γ , ionii produși sunt distribuiți omogen pe volumul iradiat, ceea ce face să domine reacția cea mai favorizată din punct de vedere energetic, adică reacția de recombinare: $H^\cdot + OH^\cdot \rightarrow H_2O$.

Dacă este prezent oxigenul O_2 , atunci este favorizată reacția: $H^\cdot + O_2 \rightarrow HO_2^\cdot$ și mai departe peroxidarea hidrogenului: $H^\cdot + HO_2^\cdot \rightarrow H_2O_2$ și $2HO_2^\cdot \rightarrow H_2O_2 + O_2$

3.4. EFECTE BIOLOGICE PRODUSE PRIN IRADIERE

a) Leziuni ale acidului dezoxiribonucleic:

Este posibil ca funcțiile celulare să fie dezorganizate de multiple leziuni ale diferitelor molecule. Analiza fenomenelor biochimice celulare conduce la acordarea unei importanțe primordiale acidului dezoxiribonucleic.

Leziunile ADN-ului pot fi:

- ☐ rupturi ale lanțului în care efectul indirect are rol preponderent prin acțiunea radicalilor apei; ele pot fi rupturi simple (fig. 3.2.) sau duble;
- ☐ leziunile bazelor (A, G, C, T) care sunt modificate chimic, suferind o hidroxilare;
- ☐ leziunile zaharurilor care sunt mai întâi oxidate, apoi hidrolizate cu eliberarea bazei, cu sau fără ruptura legăturii fosfodiesterice.

Repararea enzimatică a leziunilor variază de la un tip de celulă la altul. Repararea unei rupturi se poate face dacă lanțul complementar, care servește drept model, este intact și de aceea rupturile simple sunt, de regulă, reparabile.

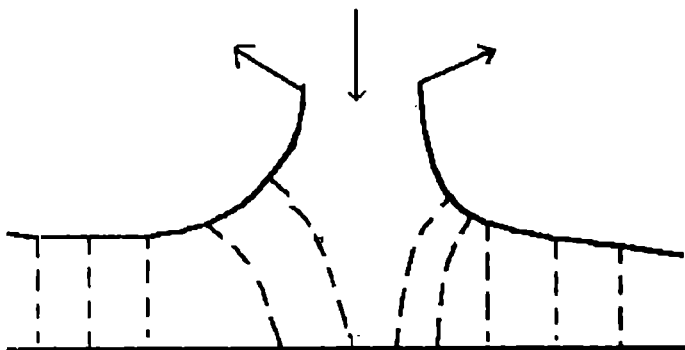


Figura 3.2: Ruptură simplă a lanțului

b) Consecințele iradierii la nivel celular

La nivel celular consecințele sunt funcție de doza de iradiere și acestea pot fi moartea celulară sau diferențierea celulară.

Pentru doze mari (zeci de kilorazi) se poate observa încetarea oricărei activități metabolice, deci moartea celulei.

Pentru doze obișnuite în radioterapie (sute de rad) celula, chiar dacă își mai păstrează o anumită activitatea metabolică, încetează diviziunea (după una sau două mitoze) ca urmare a diferențierii celulare, în final descendenții săi ajung să dispară.

c) Efectul radiațiilor asupra „ciclului celular”

Procese biologice care au loc între două mitoze formează un ciclu celular.

În figura 3.3 (a) sunt reprezentate fazele și durata lor într-un ciclu celular, iar în figura 3.3 (b) conținutul de acid dezoxiribonucleic în fiecare fază a ciclului.

Conform figurii, avem:

→ M = mitoză (1 oră)

→ G₁ = faza de repaos postmitoză (6 ore)

→ S = faza de sinteză a acidului dezoxiribonucleic, în timpul căreia se dublează cantitatea de acid din nucleu (9 ore)

→ G₂ = faza de repaos premitotică în care sinteza acidului dezoxiribonucleic se oprește (5 ore).

Studiul ciclurilor prin metoda mitozelor marcate arată următoarele efecte ale iradierii asupra ciclului celular:

- încetinirea sintezei ADN-ului (crește t_s);

■ blocajul celulelor în faza G_2 ; la sfârșitul perioadei de blocaj, celulele se vor divide simultan; în acest fel, populația celulară este parțial sincronizată, cea mai mare parte din celule parcurgând aceleași faze ale ciclului celular simultan.

. Această sincronizare este importantă în radioterapia tumorilor.

În fazele G_2 și M, celula are radiosensibilitate maximă: răspunde la energia radiațiilor absorbită prin manifestări biologice mai mult sau mai puțin ample. În faza S, radiosensibilitatea este minimă.

Factorii care influențează radiosensibilitatea celulară sunt:

- tipul celulei;
- factorii de mediu (celular): radiosensibilitatea crește cu conținutul de oxigen în mediu, gradul de vascularizare, temperatura, și scade cu conținutul de acid lactic și în prezența unui proces infecțios;
- natura radiației (eficacitatea biologică).

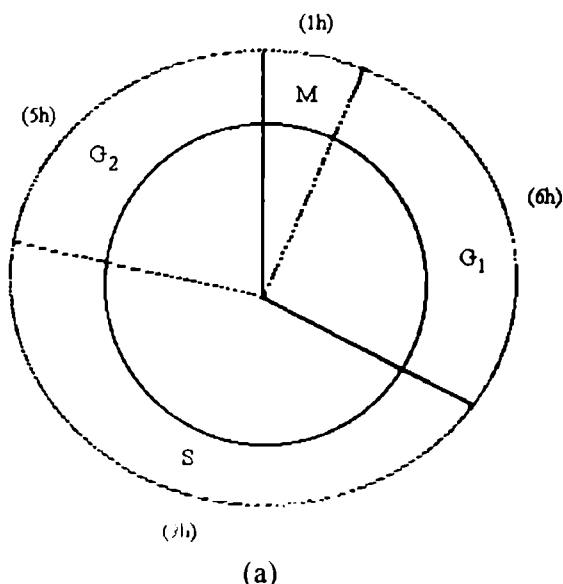


Figura 3.3 (a): Fazele și duratele lor într-un ciclu celular

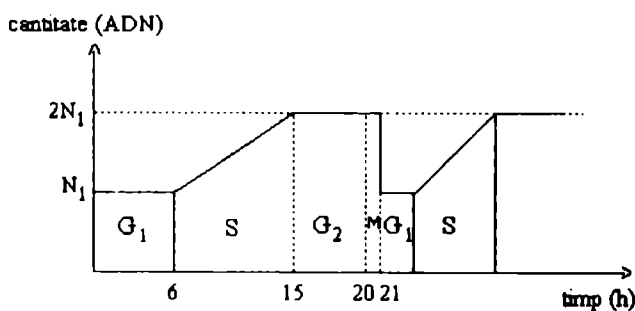


Figura 3.3 (b): Variația cantității de ADN în timpul ciclului celular

d) Mutațiile

Sunt leziuni nereparate sau slab reparate ale materialului genetic. Celula „mutantă” are caractere noi.

Cele mai frecvente sunt „mutațiile letale”, dar se produc și mutații compatibile cu diviziunea celulară.

„Mutațiile genice” modifică caracterul controlat de gena pe care apar, fără o alterare decelabilă a cromozomilor.

„Mutațiile cromozomice” ating cromozomii și pot fi vizibile la microscop. Ele se datorează ruperii cromozomilor (ca urmare a ruperii ADN-ului). Fragmentele rupte pot să se lipească cu o modificare a formei cromozomilor (aberații cromozomiale), și mai ales a raportului spațial între gene. De asemenea, fragmentele pot să rămână izolate și să fie pierdute în cursul diviziunii celulare (pierderea de informație genetică).

Numărul mutațiilor este favorizat de prezența oxigenului și a temperaturii ridicate în mediu.

3.5. CONSECINȚELE IRADIERII LA NIVELUL ȚESUTURILOR

a) Evoluția spontană a sistemelor celulare

De regulă, în toate tipurile de țesuturi, o celulă care moare poate fi înlocuită, populațiile celulare cresc și se înmulțesc. Excepție fac populațiile de tipul țesutului nervos, în care o celulă care moare nu mai poate fi înlocuită.

Înmulțirea celulară poate duce la creșterea numărului de celule (populație în creștere - întâlnită în cazul embrionului, la organisme în creștere sau la populație adultă în cazul tumorilor) sau poate compensa exact pierderile celulare (populație celulară în echilibru).

În marea majoritate a țesuturilor, populația celulară poate fi împărțită în două compartimente:

- celule matcă - la care diviziunea este autoîntreținută;
- celule funcționale - la care diviziunea se menține la echilibru, alimentându-se

din compartimentul celulelor matcă.

b) Cinetica unei populații celulare după o iradiere unică

Un țesut normal (la echilibru) iradiat suferă o depopulare iar aceasta atrage după sine o accelerare a activității de multiplicare până când efectivul inițial a fost refăcut.

La o populație celulară adultă în creștere (tumoare), evoluția în timp a numărului de celule după iradiere este rezultanta eliminării progresive a celulelor omorâte și a multiplicării celulelor supraviețuitoare.

Cinetica populației este influențată de o serie de factori locali:

- vascularizarea, prin conținutul în oxigen al sângelui, influențează radiosensibilitatea;
- un țesut are sensibilități diferite în funcție de organul în care se află;
- efectul iradierii este amplificat într-un organism bolnav (cu activitate metabolică, echilibru endocrin, stare de nutriție deficitară);
- existența sau absența iradierii întregului organism.

3.6. CONSECINȚELE IRADIERII LA NIVELUL ÎNTREGULUI ORGANISM

Efectele biologice datorate iradierii întregului organism depind de doza de iradiere:

- La doze mici $D < 200$ rad apar tulburări discrete, neglijabile;
- La doze cuprinse în intervalul $200 < D < 1000$ rad speranța de viață scade;
- La doze mari $D > 1000$ rad efectul este letal.

Studiul răspunsului global al organismului la iradiere este important în optimizarea diferitelor tratamente cu radiații și în radioprotecția omului în caz de accident nuclear (radiosensibilizare).

Efectele biologice ale radiațiilor ionizante asupra întregului organism sunt de două tipuri: somatice și genetice.

a) Efectele somatice

Apar la nivelul celulelor somatice (foarte sensibile în perioada lor de înmulțire), provocând fie moartea rapidă a individului, fie reducerea drastică a speranței sale de viață.

Leziunile somatice se produc în timpul vieții individului iradiat. Efectele care apar la scurt timp după iradiere (zile ÷ luni), se numesc *efecte imediate* și se manifestă la toți indivizii care au fost iradiați cu o doză mai mare decât o doză prag (au caracter *determinist*). Există însă și efecte biologice care apar mult mai târziu (după ani de zile), care se numesc *efecte tardive* (au o perioadă de latență) și care nu apar obligatoriu la toți indivizii iradiați, ele având un caracter întâmplător (efecte *stocastice*). Forma de manifestare este, de regulă, leucemia sau cancerul.

Corelarea între doza de iradiere și efectele induse se poate stabili numai prin studiul unui număr mare de indivizi iradiați.

b) Efectele genetice

Apar la nivelul celulelor sexuale, care sunt foarte sensibile la radiațiile ionizante în perioada înmulțirii (ca și cele somatice de altfel). Efectele imediate ale radiațiilor sunt mutagene: alterarea cromozomilor, a codului genetic, etc. la individul iradiat și conduc la sterilitate. În funcție de doză, sterilitatea poate să fie parțială sau totală, reversibilă sau definitivă. Aceste efecte imediate pot să conducă la apariția unor mutații la descendenții individului iradiat.

3.7. RADIOBIOLOGIA

Volumul informațiilor acumulate până în prezent privind efectele biologice ale radiațiilor, deși este impresionant, nu este suficient pentru stabilirea cu precizie a limitelor de siguranță în interacțiunea radiațiilor ionizante cu sistemele vii. În acest sens, s-au dezvoltat o serie de direcții de cercetare în vederea cunoașterii efectelor biologice ale radiațiilor și un nou domeniu al științei: radiobiologia.

Radiobiologia este un domeniu de graniță între fizica nucleară, chimie și biologie, cu următoarele domenii de cercetare:

□ *Radioprotecția și radiosensibilizarea* - modificarea transferului de energie de la radiații la sistemele biologice prin mijloace fizico-chimice și biologice.

Radiosensibilizarea lucrează cu substanțe ce acționează asupra sistemelor enzimactice de reparare a ADN-ului, citostatice, hormoni, hipertermie ($37^{\circ} \div 45^{\circ}\text{C}$). Radioprotecția lucrează cu substanțe care captează radicalii liberi radioindusi și blochează producerea acestora.

☐ **Radiogenetica** - studiul acțiunii mutagene a dozelor mici de radiații asupra unor populații de celule într-un interval lung de timp, în scopul limitării efectelor nocive și a realizării unor mutante biologice care să ducă la creșterea producției vegetale și animale. Rezultate importante: cunoașterea structurii acizilor nucleici (a ADN-ului și ARN-ului) și ingineria genetică.

☐ **Radiodiagnosticul** - utilizarea fasciculelor de raze X, a neutronilor epitermici și a radioizotopilor cu timp de viață scurt fixați pe suporturi biomoleculare capabile să se distribuie selectiv pe anumite organe sau formațiuni tumorale (scintigrafie), radioizotopi cu timp de viață lung, emițători γ (în tomografia computerizată).

☐ **Radioterapia** - utilizează o gamă largă de tipuri de radiații (raze X, particule încărcate - electroni, mezonii, ioni grei, etc.- raze X, neutroni, etc.).

Metode de radioterapie:

- iradiere externă, bine localizată
- iradiere interstițială (internă), cu izotopi radioactivi încorporați în pastile de diferite forme care se plantează în țesutul tumoral.

☐ **Radiosterilizarea** - utilizarea fasciculului de radiații pentru sterilizarea echipamentelor chirurgicale, a medicamentelor, a alimentelor, dezinfecția cerealelor din silozuri, etc.

☐ **Radioecologia** - studiul distribuției și cineticii radionuclizilor în ecosisteme, în scopul evaluării cât mai corecte a riscurilor biologice la scară extinsă, în special asupra diverselor categorii de colectivități umane, legate de iradierea provenită de la acești radionuclizi.

CAPITOLUL 4

MĂRIMI DOZIMETRICE

(autor: O. SIMA)

4.1. INTRODUCERE

Iradierea materiei biologice conduce la efecte complexe, care se manifestă atât la nivel celular, cât și la nivelul țesuturilor, organelor sau întregului organism.

Afectarea de către radiație a unor structuri importante din celulă poate conduce la una dintre următoarele consecințe:

1. moartea celulei sau imposibilitatea reproducerii celulare;
2. formarea unei celule modificate, dar capabile de reproducere.

Primul efect are consecințe asupra individului iradiat, în timp ce al doilea poate avea consecințe asupra persoanei iradiate (în cazul modificării celulelor somatice) sau asupra descendenților acesteia (dacă celulele modificate apar în gonade, având funcție de transmitere a informației genetice la descendenți). Așadar, expunerea la radiații conduce la două tipuri de efecte: **somatice**, care se manifestă la individul iradiat, și **ereditare**, care afectează urmașii individului iradiat.

În majoritatea țesuturilor și organelor are loc un proces natural de moarte și înprospătare a celulelor. Dacă sub acțiunea radiațiilor se produce moartea unui număr redus de celule țesutul sau organul își păstrează nealterate funcțiile. Deci o iradiere redusă nu va avea consecințe observabile. Dacă însă numărul celulelor moarte sau incapabile de reproducere depășește o anumită limită, țesutul sau organul își va pierde cu certitudine funcția, conducând, în situații extreme, chiar la decesul individului. Prin urmare, moartea sau imposibilitatea reproducerii celulare conduce la **efectele deterministe** ale radiațiilor. Acestea apar întotdeauna dacă individul a fost expus la radiații peste un anumit nivel de prag și nu se manifestă dacă iradierea este sub prag. Valoarea pragului depinde de tipul efectului, de condițiile de expunere, precum și de individ. Dacă pragul e depășit, gravitatea efectului (corelat cu numărul de celule vătămate) se accentuează odată cu creșterea intensității iradierii. Efectul este în general mai puțin grav dacă iradierea se realizează în mai multe expuneri de intensitate mică decât într-una singură mai intensă, deoarece șansa de refacere a celulelor este mai mare în primul caz. Intervalul de timp dintre iradiere și momentul apariției efectului scade cu creșterea intensității iradierii. Gradul de afectare al organismului în urma efectelor deterministe poate depinde de asemenea de faptul că întregul organism sau doar anumite organe au fost iradiate.

Apariția celulelor somatice modificate dar capabile de reproducere într-un anumit țesut se manifestă într-un mod diferit față de efectele deterministe. În multe situații organismul poate să distrugă sau să izoleze celulele modificate. Există însă o anumită probabilitate ca aceste celule să supraviețuiască și să prolifereze, conducând în final, după o

perioadă de latență mai lungă sau mai scurtă, la dezvoltarea unui cancer. Efectele de acest tip se numesc **stocastice**, datorită caracterului aleator al apariției lor. Modificarea celulelor somatice poate deci conduce la efecte stocastice somatice, care se manifestă la individul iradiat. În cazul în care modificările celulare se produc într-o celulă care are funcția de a transmite informații genetice descendenților, efectele stocastice asociate au caracter ereditar, manifestându-se la urmașii persoanei iradiate.

Din observațiile făcute asupra unor grupuri iradiate la nivele mult mai mari decât iradierea naturală se poate trage concluzia că probabilitatea efectelor stocastice este proporțională cu iradierea. Concluziile observațiilor făcute la iradieri mici sunt mult mai incerte. Se acceptă ca o ipoteză prudentă proporționalitatea între probabilitatea producerii efectelor și nivelul de iradiere, chiar și la nivele de iradiere foarte mici (ipoteza relației liniare, fără prag între probabilitatea efectelor stocastice și nivelul de iradiere). În ceea ce privește gravitatea efectelor stocastice, aceasta este independentă de intensitatea iradierii: gravitatea unui cancer depinde de tipul acestuia și de organul afectat, dar nu de cauza care l-a generat.

Pentru caracterizarea relației între iradiere și efectele produse este necesară definirea unor mărimi dozimetrice, care să țină cont atât de aspectele fizice ale interacției radiației cu materia, cât și de consecințele biologice ale acestei interacții.

4.2. DOZA ABSORBITĂ

Deoarece efectul primar al radiațiilor este ionizarea și excitarea iar mărimea acestui efect este direct proporțională cu energia absorbită în țesut de la radiații, este natural să se definească o mărime caracteristică a expunerii la radiații pe această bază. Doza absorbită D se definește ca fiind energia cedată de radiații în unitatea de masă a unei substanțe,

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (4.2.1)$$

Doza absorbită se măsoară în Gray (Gy),

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}} \quad (4.2.2)$$

Vechea unitate de măsură, numită rad, este egală cu:

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy} \quad (4.2.3)$$

Doza absorbită este o mărime dozimetrică fizică.

Efectele somatice imediate, rezultate dintr-o expunere externă intensă, sunt corelate cu doza absorbită. Informații despre aceste efecte se obțin din analiza accidentelor implicând expuneri intense (accidente la reactori nucleari - la Cernobîl aproximativ 100 de persoane au încasat o doză de peste 1 Gy -, accidente la submarine cu propulsie nucleară, accidente la manipularea unor surse foarte intense), din datele de la Hiroshima și Nagasaki și de la expuneri accidentale ocazionate de testele bombelor nucleare, precum și din urmărirea pacienților supuși radioterapiei.

Analiza cazurilor de expunere omogenă la radiații intense arată că din punctul de vedere al gravității efectelor pot fi definite 5 domenii de doză absorbită:

♦ 0 - 0,25 Gy. În acest domeniu de doză absorbită nu se manifestă nici un simptom clinic.

♦ 0,25 - 1 Gy. Simptomele clinice sunt reduse (stări de greață), sau lipsesc. Spitalizarea nu este necesară, dar se recomandă urmărirea medicală timp de câteva zile.

♦ 1 - 2,5 Gy. Stări de greață și vomă care apar relativ repede: la o doză absorbită de 2 Gy, 50% dintre persoanele iradiate prezintă aceste simptome, care apar după aproximativ 3 ore de la iradiere, dar rareori persistă mai mult de 2 zile. La doze absorbite între 1 și 2 Gy concentrația limfocitelor din sânge se reduce cu 50% în primele 2 zile de la iradiere. Dacă această scădere nu persistă, efectul va fi de gravitate medie. În caz contrar situația se poate agrava, conducând eventual chiar la deces (începând de la 2 Gy). În toate situațiile se impune spitalizarea și supravegherea medicală strictă.

♦ 2,5 - 5 Gy. Simptome clinice grave, care se instalează rapid. Se manifestă modificări hematologice importante. Crește susceptibilitatea la infecții. Spitalizarea este obligatorie, iar perfuziile sunt recomandabile. Există o probabilitate însemnată de deces, dependentă de starea generală de sănătate, de măsurile profilactice luate înainte de iradiere ca și de tratamentul ulterior.

♦ peste 5 Gy. În acest caz supraviețuirea devine o problemă, funcție de mai mulți factori (starea de sănătate, omogenitatea repartizării dozei). Spitalizarea este obligatorie, dar alegerea tratamentului este dificilă. Doze absorbite între 10 și 50 Gy conduc în general la deces în a doua săptămână după iradiere, datorită afectării sistemului gastrointestinal și a plămânilor. Peste 50 Gy decesul se produce în două zile prin disfuncționalitatea sistemului cerebrovascular și neurologic.

Este important să se cunoască doza la care probabilitatea de deces are o valoare precizată. Se definește doza letală $DL_{p,T}$ ca doza care determină o probabilitate p (procente) de deces în timpul T (zile) de la iradiere. Astfel, $DL_{50/60}$ este doza care determină decesul a 50% dintre cei iradiați în termen de 60 de zile de la data iradierii, cauza principală de deces fiind vătămarea măduvei osoase. Valoarea dozei $DL_{50/60}$ la om este în jur de 3,5 Gy (spre comparație, valorile pentru microorganisme sunt de ordinul câtorva mii de Gy, pentru insecte de sute de Gy). Semnificația valorii $DL_{50/60}$ este statistică și trebuie aplicată cu precauție.

În afara efectelor care afectează funcționarea globală a organismului, iradierea poate conduce la apariția unor îmbolnăviri ale diferitelor țesuturi și organe iradiate separat. În cazul unei iradiere neuniforme efectele depind de ponderea iradierii diferitelor organe.

Dacă aceeași doză totală este absorbită ca urmare a unor expuneri de intensitate mai mică, distribuite într-un interval de timp lung, efectele sunt în general mult mai mici decât în cazul unei singure expuneri foarte intense, realizate într-un timp scurt. Prin urmare efectele iradierii depind nu numai de doza absorbită, ci și de debitul dozei, definit prin relația:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \text{ (Gy/s)} \quad (4.2.4)$$

4.3. ECHIVALENTUL DE DOZĂ

La aceeași doză absorbită, particulele alfa determină o deteriorare locală mult mai intensă decât radiațiile gama, deoarece în primul caz întreaga energie cedată este distribuită de-a lungul unui parcurs foarte scurt. De exemplu, șansa de deteriorare a ambelor lanțuri ale unei molecule de ADN este mult mai mare în cazul particulelor alfa; în consecință, probabilitatea de refacere a moleculei de ADN este mai mică în cazul particulelor alfa decât în cazul radiațiilor gama. Deci la aceeași doză absorbită în același organ efectul biologic depinde de natura și energia radiațiilor; eficacitatea biologică a diferitelor radiații este diferită.

Factorul de calitate Q al unei radiații cu o energie dată măsoară capacitatea acestei radiații de a produce ionizări (și implicit, de a produce efecte biologice). Produsul dintre factorul de calitate și doza absorbită definește echivalentul de doză H , care permite, în anumite condiții, evaluarea dozelor care produc același efect biologic indiferent de natura și energia radiațiilor implicate.

$$H = D Q \quad (4.3.1)$$

Unitatea de măsură a echivalentului de doză este Sievert (Sv):

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg} \quad (4.3.2)$$

Se mai folosește, ca unitate de măsură tolerată,

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} \quad (4.3.3)$$

Valorile factorului de calitate Q au fost stabilite în funcție de L , energia transferată pe unitatea de parcurs la propagarea radiației respective în apă. Deși L este funcție de energia radiațiilor, în multe situații, datorită necunoașterii distribuției exacte a dozei absorbite în țesut în funcție de L , se utilizează valori medii ale factorului de calitate. În acord cu recomandările ICRP 26 din anul 1977, în Standardele de bază de radioprotecție elaborate la Institutul de Fizică Atomică (1991) sunt adoptate următoarele valori medii:

Tabelul 4.1: Valorile factorului de calitate Q pentru diferite tipuri de radiații
(Standarde de bază de radioprotecție, IFA 1991)

Radiații	Factor de Calitate
Radiații X, gama și electroni	1
Neutroni și protoni	10
Neutroni termici	2,3
Particule alfa și mai grele, sarcina ≥ 1	20

Publicația ICRP 60 din anul 1990 include valori revizuite (în special pentru neutroni) ale factorilor de pondere ale diferitelor radiații. Aceste valori sunt:

Tabelul 4.2: Valorile factorilor de pondere ai diferitelor radiații, conform Publicației 60 a ICRP din anul 1990

Radiații	Factor de Pondere
Fotoni, electroni și mioni	1
Neutroni, $E < 10$ keV	5
Neutroni, $10 \text{ keV} < E < 100 \text{ keV}$	10
Neutroni, $100 \text{ keV} < E < 2 \text{ MeV}$	20
Neutroni, $2 \text{ MeV} < E < 20 \text{ MeV}$	10
Neutroni, $E > 20 \text{ MeV}$	5
Protoni cu energia peste 2 MeV	5
Particule alfa, fragmente de fisiune, ioni grei	20

Trebuie subliniat că valorile factorului de calitate sunt obținute în ipoteza unor iradiieri slabe. În consecință echivalentul de doză este util în scopul evaluării riscurilor efectelor stocastice, întârziate, ale radiațiilor, dar este nerelevant în cazul efectelor imediate ale iradierilor acute. Astfel, dacă un anumit organ primește un același echivalent de doză H probabilitatea de a se produce un cancer fatal al celui organ este aceeași, indiferent dacă iradierea s-a produs cu particule alfa, cu radiații gama sau cu electroni.

Pentru a descrie variația în timp a echivalentului de doză încasat se definește debitul echivalentului de doză:

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (4.3.4)$$

4.4. ECHIVALENTUL DE DOZĂ EFECTIV

Iradierea diferitelor țesuturi sau organe conduce la efecte dependente de țesutul iradiat, efecte care în general sunt greu de comparat sau de echivalat între ele. Există însă un efect, și anume cancerul fatal, care are aceeași consecință (decesul individului), indiferent de organul iradiat. Relativ la un deces prin cancer, e prea puțin important dacă organul afectat a fost plămânul sau un alt organ. Prin urmare, din punctul de vedere al probabilității de producere a cancerului fatal are sens echivalarea iradierii diferitelor organe sau țesuturi, iradiere care să conducă la aceeași probabilitate de cancer fatal.

Riscul de producere a unui cancer fatal pentru același echivalent de doză H depinde de organul iradiat. Acest risc nu poate fi calculat prin studii teoretice, ci are la bază observațiile efectuate, în primul rând asupra supraviețuitorilor bombardamentelor atomice de la Hiroshima și Nagasaki. Explozia bombelor atomice a determinat o iradiere a întregului organism, cu o distribuție aproximativ uniformă a dozei, pentru un număr mare de indivizi. Starea de sănătate a acestora a fost monitorizată amănunțit în decursul timpului. Analiza consecințelor bombardamentelor permite să se determine care este probabilitatea de producere a cancerului fatal în funcție de doza absorbită. Iradierea în cazul bombardamentelor a fost uniformă (realizată prin radiații gama și neutroni), dar este de interes să se poată determina care este probabilitatea de producere a cancerului fatal și în cazul unor distribuții neuniforme ale dozelor (astfel de distribuții neuniforme se realizează de exemplu în cazul contaminării interne cu radionuclizi).

În cazul lotului studiat la Hiroshima și Nagasaki s-a constatat de exemplu că numărul deceselor prin cancer pulmonar este de aproximativ 4 ori mai mare decât numărul deceselor prin cancer tiroidian, deși doza absorbită de ambele organe a fost aceeași. Din numărul total de decese prin cancer, decesele prin cancer pulmonar au o pondere w_p , mai mare decât ponderea w_t a deceselor prin cancer tiroidian. Este natural să se presupună că dacă doar plămânul ar fi fost iradiat atunci probabilitatea de producere a cancerului fatal ar fi fost egală cu w_p înmulțit cu probabilitatea de producere a cancerului fatal la iradierea cu aceeași doză a întregului organism. Dacă se acceptă ipoteza relației liniare, fără prag, între probabilitatea de producere a cancerului fatal și echivalentul de doză absorbit, atunci s-ar obține aceeași probabilitate de producere a cancerelor fatale la iradierea cu un echivalent de doză H_p doar a plămânului, ca și la iradierea cu un echivalent de doză $w_p \cdot H_p$ a întregului organism; în primul caz toate cancerele s-ar produce la plămân, în al doilea s-ar produce cu diferite ponderi la diferite organe, dar acest lucru este prea puțin important. Raționând la fel pentru toate organele iradiate, rezultă că o distribuție neuniformă a echivalentului de doză H_i la diferite organe i are același efect global ca un echivalent de doză H_E la iradierea uniformă a întregului organism, dacă H_E este definit prin relația:

$$H_E = \sum_i w_i H_i \quad (4.4.1)$$

în care w_i reprezintă ponderea corespunzătoare organului i , determinată așa cum s-a schițat mai sus.

Mărimea H_E definită prin ecuația precedentă se numește echivalentul de doză efectiv, notat prescurtat EDE. La o aceeași valoare a echivalentului de doză efectiv, probabilitatea efectelor stocastice este aceeași, indiferent de modul de repartizare al iradierii diferitelor organe individuale. Unitatea de măsură a echivalentului de doză efectiv este de asemenea Sievertul.

Publicația ICRP 26 (1977), care stă la baza normelor de radioprotecție în vigoare în multe țări, recomandă anumite valori pentru factorii de pondere w_i . ICRP (International Commission on Radiological Protection) este o comisie cuprinzând experți din diferite țări care pe baza analizei ansamblului de date și observații existente pe plan mondial referitoare la efectele radiațiilor face recomandări în privința măsurilor care trebuie adoptate pentru reducerea efectelor nocive ale radiațiilor. Recomandările ICRP sunt indicate în Tabelul 4.3 și se referă, pe lângă cancerele fatale, și la efectele genetice grave manifestate la primele două generații de descendenți ai persoanei iradiată.

Tabelul 4.3: Valorile factorilor de pondere pentru diferite țesuturi
(Publicația ICRP 26 din anul 1977)

Țesut	Factor de pondere
Gonade	0,25
Sâni	0,15
Măduva osoasă	0,12
Plămâni	0,12
Tiroida	0,03
Suprafața oaselor	0,03
Restul țesuturilor	0,30
Întregul organism	1

În aceeași publicație sunt indicați și factorii de risc pentru diferite organe. De exemplu, pentru plămâni, riscul de cancer fatal este de 1 la 500 Sv⁻¹; adică dacă 500 de indivizi încasează un echivalent de doză de 1 Sv la plămâni, atunci în medie unul dintre aceștia va contracta un cancer pulmonar fatal. Factorii de risc au semnificație doar dacă se acceptă ipoteza relației liniare, fără prag, între probabilitatea efectelor și echivalentul de doză efectiv.

Este de asemenea important de precizat că valorile din tabel sunt valori mediate pe grupul de persoane iradiate (conținând copii, adulți, bătrâni, de ambele sexe). O analiză diferențială pune în evidență faptul că factorul de risc depinde de vârstă, sex, de starea de sănătate generală, de acțiunea simultană a unor alți factori agravanți; în general, factorul de risc este mai mare în acele cazuri în care activitatea de multiplicare celulară este mai intensă.

Trebuie subliniat că valorile din tabel, fiind determinate din analiza datelor de observație, au o precizie dependentă de calitatea datelor. Reanalizarea consecințelor bombardamentului de la Hiroshima și Nagasaki, observarea producerii cancerului fatal cu probabilitate mare (dar după timp lung) la anumite țesuturi și organe care în publicația ICRP 26 erau tratate global, au determinat revizuirea factorilor de pondere și de risc (Publicația ICRP 60 din anul 1990). Existența unor cancere cu timp de latență foarte lung (deci probabilitatea ca în continuare să se producă decesul prin cancer pentru unii supraviețuitori ai bombardamentelor) face imposibilă determinarea factorului de risc de cancer global numai pe baza observațiilor; acestea trebuie completate cu modele care să estimeze numărul de decese care se vor mai produce de acum înainte.

Pentru a descrie variația în timp a echivalentului de doză efectiv se definește debitul echivalentului de doză efectiv:

$$H_E = \frac{dH_E}{dt} \quad (4.4.2)$$

4.5. ECHIVALENTUL DE DOZĂ EFECTIV COLECTIV

În cazul în care un grup de indivizi dintr-o populație dată este iradiat este important să se determine numărul de indivizi asupra cărora se vor manifesta efectele stocastice ale iradierii. Dacă se acceptă ipoteza relației liniare, fără prag, pentru fiecare individ probabilitatea efectului respectiv este egală cu factorul de risc, constant, înmulțit cu echivalentul de doză efectiv. În consecință numărul mediu de efecte care se vor produce este egal cu factorul de risc înmulțit cu suma valorilor echivalentului de doză efectiv pentru toți indivizii iradiați. În acest context este utilă definirea echivalentului de doză efectiv colectiv S_E prin relația:

$$S_E = \sum_i H_{E,i} \quad (4.5.1)$$

în care $H_{E,i}$ este echivalentul de doză efectiv pentru individul i din grupul considerat. Numărul mediu de efecte stocastice care se vor produce este egal cu produsul dintre factorul de risc și S_E .

Echivalentul de doză efectiv colectiv se măsoară în Sievert om (Sv om). Numărul de efecte stocastice așteptate pentru o populație iradiată nu depinde separat de numărul de indivizi și de echivalentul de doză efectiv individual, ci doar de valoarea S_E . De exemplu, în

cazul unei populații de $2 \cdot 10^7$ oameni și a unui debit al echivalentului de doză efectiv de 1 mSv pe an, valoarea S_e este de $2 \cdot 10^4$ Sv om; numărul de decese de cancer așteptate pe an este același pentru o populație de 10^7 oameni, care încasează un debit al echivalentului de doză efectiv de 2 m Sv pe an; evident, în al doilea caz probabilitatea ca un individ să moară de cancer este dublă față de primul caz, dar numărul total de decese este același.

În momentul de față estimarea numărului de decese cauzate de iradiere pentru o populație dată supusă unei iradiieri slabe păstrează un anumit grad de incertitudine. Aceasta este legată mai ales de extrapolarea riscului determinat pe baza studiilor efectuate la doze mari și debite de doză mari (cazul Hiroshima sau Nagasaki) pentru situația dozelor mici și a debitelor de doză mici. Această extrapolare se poate realiza în mod riguros doar în ipoteza că relația dintre probabilitatea efectelor stocastice și echivalentul de doză efectiv este liniară, fără prag. Adoptarea acestei ipoteze corespunde unui punct de vedere prudent, acceptat de ICRP, și simplifică estimarea numărului de efecte așteptate într-un grup dat, pe baza echivalentului de doză efectiv colectiv. Pe de altă parte un număr însemnat de specialiști consideră că această ipoteză nu este corectă în cazul dozelor mici și debitelor de doză mici; între argumentele invocate de aceștia este constatarea faptului că populații care trăiesc în zone cu un fond natural de radiații ridicat nu prezintă o incidență a cancerului în proporția prezisă de ipoteza relației liniare, fără prag.

4.6. VALORI TIPICE ALE DOZELOR

Valoarea estimată a echivalentului de doză efectiv, mediat pe întreaga planetă, este de 2,4 mSv/an (Raportul UNSCEAR din 1988 și din 1993; UNSCEAR = United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic radiation = Comitetul Științific al ONU privind efectele radiațiilor atomice). Din această valoare 1,1 mSv/an se datorează radonului (^{222}Rn) și descendenților săi cu timp de înjumătățire scurt, 0,16 toronului (^{220}Rn) și descendenților acestuia, 0,35 mSv/an radiației cosmice și 0,33 mSv pe an ^{40}K (Tabelul 4.4).

Tabelul 4.4: Echivalentul de doză efectiv (mSv/an) mediu pe întreaga populație - Iradiere naturală (extras din UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionizing radiation 1988)

Sursa	Doza Externa	Doza Interna	Total
Radiația cosmică - direct ionizantă	0,30	-	0,30
Radiația cosmică - neutroni	0,055	-	0,055
Radionuclizi cosmogenici	-	0,015	0,015
Potasiu-40	0,15	0,18	0,33
Seria uraniu-radiu (total)	0,1	1,24	1,34
din care			
Radon și descendenți		1,1	
Seria toriului (total)	0,16	0,18	0,34
din care			
Toron și descendenți		0,16	
Total	0,8	1,6	2,4

Estimarea echivalentului de doză efectiv pentru țara noastră (Radioactivitatea Naturală în România, Societatea Română de Radioprotecție, 1994) conduce la valori apropiate de cele corespunzătoare întregii populații a planetei. Astfel, contribuția radiației cosmice este de 0,28 mSv/an (0,25 mSv/an din partea componentei ionizante direct, 0,03 din partea neutronilor), a iradierii gama externe de 0,46 mSv/an, a radonului și toronului (împreună cu descendenții) de 1,2 mSv/an în zone urbane și 1,4 mSv/an în zone rurale, iar contribuția iradierii interne datorată altor radionuclizi este de 0,23 mSv/an.

În ceea ce privește iradierea artificială, la doza anuală medie pentru întreaga populație a planetei cea mai mare contribuție o aduce în prezent expunerea medicală; 90 - 95% din doza asociată este încasată prin radiografii și radioscopii. Urmează apoi iradierea produsă de radionuclizii cu timp de viață relativ lung dispersați pe întreaga planetă ca urmare a testelor armelor nucleare efectuate în special până în anul 1962; contribuția cea mai mare pentru populația actuală provine de la ^{90}Sr și ^{137}Cs , dar pe termen lung este mai important ^{14}C , care va afecta și generațiile următoare. Expunerea populației rezultată ca urmare a activităților din energetica nucleară este mult mai mică (Tabelul 4.5).

Tabelul 4.5: Valoarea individuală a echivalentul de doză efectiv în prezent (mSv/an) provenind de la diferite surse (extras din UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionizing radiation, 1988)

Sursa	Valoare medie	Valoare tipică
Fondul natural	2,4	1 - 5
Expunere medicală - diagnostic	0,4 - 1	0,1 - 10
Testele armelor nucleare	0,01	0,01
Expunere profesională	0,002	0,5 - 5
Expunerea populației rezultată din industria nucleară	0,0002	0,001 - 0,1

Coloana a treia din Tabelul 4.5 prezintă valorile tipice ale dozelor pe un individ expus; coloana a doua se obține împărțind echivalentul de doză efectiv colectiv cauzat de sursa dată la numărul de indivizi din întreaga populație.

O ultimă sursă de iradiere, neinclusă în Tabelul 4.5, este reprezentată de accidente de la centralele nucleare. De fapt singurul accident relevant pentru doza de iradiere a populației a fost accidentul de la Cernobâl (aprilie 1986). În primul an de la accident, contribuția acestuia la echivalentul de doză efectiv a fost estimată la 0,77 mSv în Bulgaria, 0,68 mSv în Austria, 0,6 mSv în România și Grecia, 0,57 mSv în Finlanda ș.a.m.d. Echivalentul de doză efectiv care se așteaptă a fi încasat în decursul timpului în total ca urmare a accidentului de la Cernobâl este estimat la 1,2 mSv pentru Europa de Sud Est. Echivalentul de doză efectiv colectiv care se așteaptă a fi încasat în decursul timpului (mărime numită angajarea echivalentului de doză efectiv colectiv) este estimat la valoarea de 600000 Sv om, din care 40% în Comunitatea Statelor Independente, 57% în restul Europei și 3% în restul emisferei nordice.

CAPITOLUL 5

RADIAȚIA COSMICĂ

Radiația cosmică (sau razele cosmice) reprezintă fluxul de microparticule stabile (protoni, particule α , etc.) de energii foarte mari, cuprinse între $10^4 \div 10^{21}$ eV, care umplu spațiul cosmic. Radiația cosmică (RC) a fost descoperită în 1912 de către W. Hess.

În drumul lor către Pământ, RC trebuie să străbată un strat gros de substanță (10^3 g/m²) format de atmosfera terestră cu care interacționează modificându-și compoziția. De aceea, compoziția radiațiilor care vin din spațiul cosmic, care constituie *radiația cosmică primară (RCP)*, diferă de compoziția radiațiilor care ajung la suprafața Pământului, după parcurgerea atmosferei terestre și care formează *radiația cosmică secundară (RCS)*.

Interesul pentru studiul RC a fost stimulat, în primul rând, de dezvoltarea industriei aviatice, care a creat avioane ce zboară la înălțimi foarte mari, în straturi rarefiate ale atmosferei, unde intensitatea radiației cosmice este mult mai mare decât la suprafața Pământului, deci și efectul asupra organismului uman în timpul zborului este mai puternic. De asemenea, aceste studii au fost stimulate și de zborurile cosmice.

În al doilea rând, studiul poluării radioactive locale sau globale, ca urmare a utilizării energiei nucleare în centrale nucleare sau în explozii nucleare, necesită o bună cunoaștere a dozei globale și a factorilor care generează doza, deci și a radiației cosmice.

Radiațiile cosmice au fost observate la diferite nivele: la nivelul mării, în laboratoare subterane, în laboratoare situate în munți la mare altitudine, cu ajutorul baloanelor până la înălțimi de aproximativ 40 km, cu aparatură instalată la bordul sateliților și rachetelor.

Radiațiile primare care ajung la atmosfera terestră sunt formate din nuclee atomice, electroni, pozitroni, fotoni și neutrini, dar sub denumirea de *radiație cosmică primară* sunt cuprinse numai particulele cu sarcină electrică.

Similar, *radiația cosmică secundară* se referă, în special, la particulele cu sarcină electrică generate sub acțiunea radiației cosmice primare în atmosfera terestră.

5.1. RADIAȚIA COSMICĂ PRIMARĂ

În vecinătatea Pământului, radiația cosmică primară (RCP) este formată din radiația cosmică galactică (generată de surse neidentificate, aflate la distanțe mari de Pământ) și radiația cosmică solară.

De regulă, sub denumirea de radiație cosmică primară se fac referiri la radiația cosmică de origine galactică. Intensitatea ei este de $2 \div 4$ particule/(cm² sec), are o distribuție izotropă

în spațiu și este constantă în timp. În drumul lor de la sursele îndepărtate până la Pământ, radiațiile de origine galactică au „hoinărit” mult prin spațiu, au suferit devieri ale traiectoriei sub acțiunea câmpurilor magnetice interplanetare și a câmpului magnetic terestru, pierzându-și caracteristicile direcționale și temporale inițiale (legate de sursa și momentul emisiei lor).

Radiația cosmică primară este formată dintr-o *componentă nucleară* (care cuprinde nuclee de la cele mai simple - protonul, heliul, etc.- la cele mai complexe) și o *componentă leptonică* (care cuprinde electronii și pozitronii). Componenta nucleară nu conține antinuclee.

Analiza compoziției chimice a radiației cosmice primare indică o structură care conține aceleași elemente ca și în sistemul nostru solar, dar cu abundențe diferite, după cum se observă în fig.5.1.

Se observă că radiațiile cosmice primare sunt formate, în cea mai mare parte, din protoni (79%) și din particule α (20%). Restul de 1% este format din carbon, azot, oxigen și elemente mai grele, ajungând până la fier, cobalt, cupru, nichel, zinc. Este de remarcat faptul că abundența relativă a elementelor ușoare (litiu, beriliu, bor, etc.) este mult mai mare în radiația cosmică primară decât în sistemul solar.

În fig. 5.2. este reprezentată intensitatea componentei nucleare I(E) în funcție de energia E care, cu excepția energiei celor mai joase, este descrisă de relația:

$$I(E) \propto E^{-6}$$

(5.1.)

unde E este energia per nucleon.

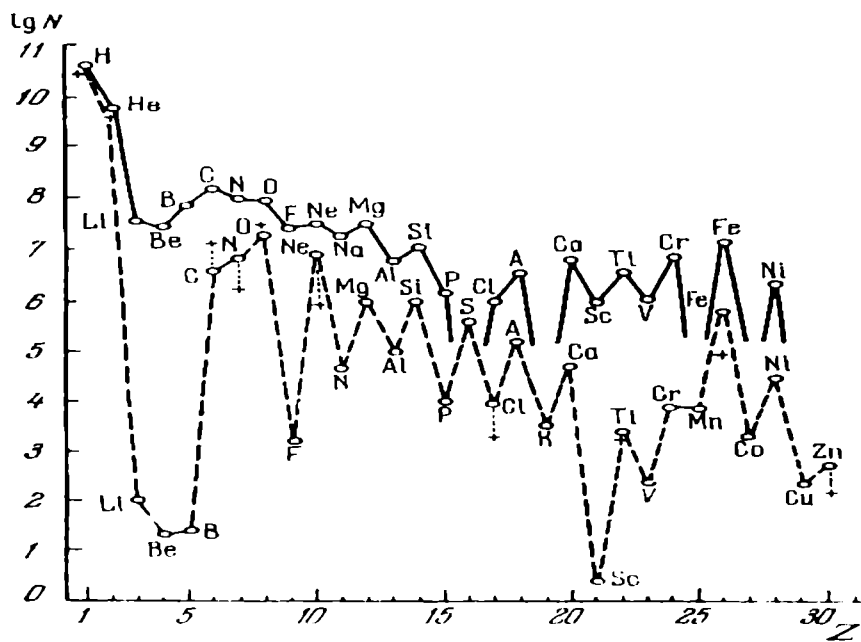


Figura 5.1: Distribuția elementelor chimice în RCP și în Sistemul Solar (SS)

Spectrul electronilor a căror energie este mai mare decât un GeV are o comportare similară.

Deși spectrul energetic al RCP se întinde până la energii foarte mari, numărul de particule cu energii mai mari de $10^{19} \div 10^{20}$ eV este foarte mic (cam 1 particulă /m² la 200 de ani).

Densitatea medie de energie a RCP în spațiul cosmic din zona Pământului este comparabilă cu cea a energiei luminoase, a energiei magnetice a galaxiei și a energiei cinetice a gazului interstelar ($\bar{w} \sim 1$ eV/cm³).

În anul 1961 au fost identificați experimental electroni și pozitroni în RCP, dincolo de limitele atmosferei. Fluxul de electroni în radiația cosmică primară este de $\sim 1,5$ % din fluxul total al RCP, iar fluxul de pozitroni este de cinci ori mai slab decât cel de electroni. Prezența electronilor și a pozitronilor în RCP poate fi o consecință a ciocnirii particulelor cosmice cu nucleele din gazul interstelar în urma cărora sunt generați mezozi π^\pm care, prin dezintegrări succesive, produc electroni și pozitroni în cantități aproximativ egale precum și neutrini electronici ν_e și mionici ν_μ .

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \quad (5.1.2)$$

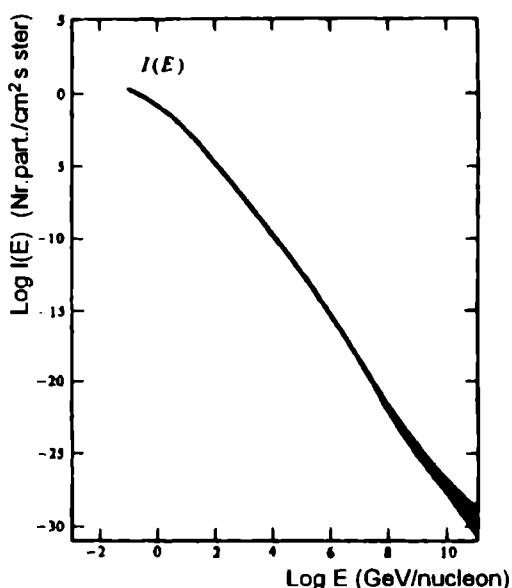


Figura 5.2: Spectrul energetic al componentei nucleare a RCP

Faptul că numărul de electroni este de cinci ori mai mare decât cel de pozitroni, conduce la concluzia că cea mai mare parte a electronilor se emite direct din surse galactice.

Absența componentei electronice a RCP care ajunge în straturile superioare ale atmosferei este explicată prin acțiunea câmpului magnetic terestru și a celui interplanetar care deviază electronii, astfel încât nu ajung decât electroni foarte rapizi.

Durata de viață a electronilor rapizi în galaxie nu este mare, deoarece ei își pierd energia prin radiație și devin electroni lenți care nu mai ajung la suprafața Pământului.

Studiile satelitare au arătat că odată cu creșterea înălțimii crește și intensitatea componentei electronice, de la 300 km la 1800 km ea amplificându-se de 20 de ori.

Tot cu ajutorul sateliților s-a observat că la înălțimi mari particulele încărcate sunt prinse în capcana câmpului magnetic pământesc și formează așa-numitele „centuri de particule” ale Pământului.

Câmpul magnetic pământesc are și alte efecte asupra radiației cosmice primare, ca de exemplu :

- ☐ asimetria est-vest : intensitatea RCP care vin dinspre vest este mai mare decât a celor ce vin dinspre est;
- ☐ efectul de latitudine: intensitatea RCP crește pe măsură ce ne îndepărtăm de ecuator spre pol.

5.2. RADIAȚIA COSMICĂ SECUNDARĂ

În urma interacției RCP cu atomii (nucleele) atmosferei au loc procese de tip avalanșă de mare intensitate:

a) *Avalanșa electrono-fotonică (EF):*

Particulele cu sarcină din RCP sunt frânate în câmpul coulombian al nucleelor atomice din atmosferă și produc radiații de frânare (fotoni γ).

La rândul lor, fotonii produc perechi (e^+ , e^-) în interacție cu nucleele atmosferei, iar electronii și pozitronii generați își pierd energia prin radiații de frânare (fotoni) și procesul continuă în avalanșă. Numărul de fotoni și de perechi (e^+ , e^-) crește la fiecare nouă generație căpătând aspectul unei jerbe.

Când energia fotonilor este sub pragul de generare a perechii (e^+ , e^-), generarea este oprită și au loc numai ionizări-excitări.

b) *Avalanșa electrono-nucleară (sau cascada nucleară)*

Dacă o particulă din RCP cu o energie foarte mare (mai mare de $3 \cdot 10^9$ eV) interacționează tare cu un nucleu din atmosferă (sau orice altă substanță), se produce generarea unui număr mare de particule noi: fragmente nucleare, neutroni, protoni și diferite tipuri de mezoni (π^+ , π^0 , K^+ , K^0 , etc.) de energii mari.

Mezonii sunt particule instabile și se dezintegrează direct sau în cascadă, până la produsele finale stabile: fotoni, electroni pozitroni și neutrini.

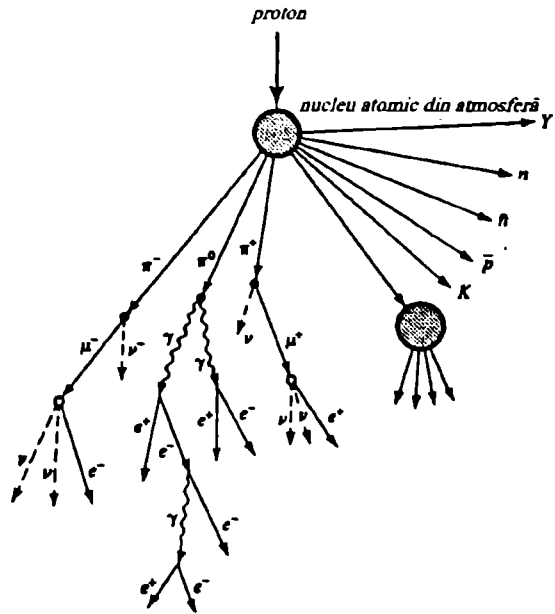
Electronii, pozitronii și fotonii vor dezvolta o jerbă electrono-fotonică până la epuizarea energiei sub valoarea pragului (\sim un MeV) de generare a perechii (e^+ , e^-). În figura 5.3. este reprezentată schema unui astfel de proces.

Când energia particulei primare este mai mare de 10^{12} eV, la interacția ei cu substanța se formează jerbe imense, cu milioane de particule, care se împrăștie pe sute de km^2 .

Un proton din RCP cu o energie $E > 10^{12}$ eV are drumul liber mijlociu în atmosferă de ordinul 80 g/cm^2 . Trecând prin întreaga atmosferă (1000 g/cm^2) el poate suferi zeci de

ciocniri. La fiecare ciocnire pierde aproximativ jumătate din energia incidentă prin generarea de hadroni (particule care interacționează tare), așa cum este prezentat și în fig. 5.4.

Figura 5.3: Jerbă de mare energie generată în atmosferă de un proton din RCP



Soarta mezonilor π generați diferă în funcție de sarcina și de energia lor.

Mezonii π^0 au durată medie de viață foarte scurtă ($\tau \approx 10^{-16}$ s) și se dezintegrează în 2γ (fig. 5.4.).

Mezonii π^\pm cu energia $E \leq 200$ GeV se dezintegrează înainte de a interacționa ($\tau_\pm = 2,6 \cdot 10^{-8}$ s) cu un alt nucleu din substanță (fig. 5.4.).

Mezonii π^\pm cu energia $E > 200$ GeV generați de RCP cu energia $E \sim 10^4 \div 10^5$ GeV pot parcurge distanțe mari, comparabile cu drumul lor liber mijlociu în atmosferă (~ 80 g/cm²), fără să se dezintegreze și participă alături de protonii primari la multiplicarea hadronilor (fig. 5.5).

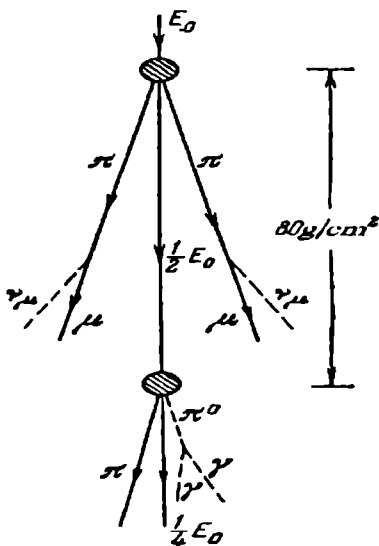


Figura 5.4: Trecerea unei particule primare (proton) de mare energie ($10^3 \div 10^4$ eV) prin atmosferă

Din cele arătate până acum, rezultă că RCS are trei componente:

- ☐ Componenta hadronică (π , n , p) - sau componenta nucleară activă;
- ☐ Componenta miuonică - sau componenta „dură”;
- ☐ Componenta electrono-fotonică - sau componenta „moale”.

Ponderea diferitelor componente variază în funcție de distanța până la Pământ. Astfel, la nivelul mării, radiația cosmică secundară conține ~ 80 % miuoni, ~ 20%electroni și 0,02 % protoni primari. La altitudinea de 30 Km, radiația cosmică secundară conține doar 37% protoni, 60% neutroni și 3% alte nuclee.

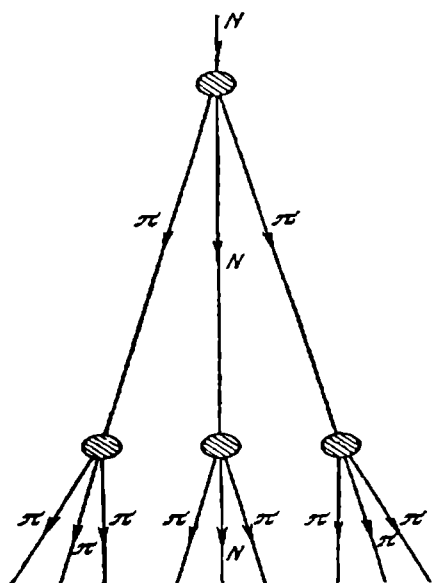


Figura 5.5: Cascadă nucleară dezvoltată cu participarea pionilor încărcati electric, generați de particula primară cu $E > 2 \cdot 10^4$ GeV

După puterea de penetrare prin substanță RCS poate fi grupată în două componente:

- ☐ Componenta dură - care are putere mare de penetrare și trece prin 10 cm Pb (miuoni);
- ☐ Componenta moale - care este oprită de 10 cm Pb (electroni și fotoni).

În figura 5.6. este reprezentată dependența intensității celor trei componente ale radiației cosmice secundare de lungimea drumului parcurs (r) în atmosferă, începând de la limita ei superioară.

Se observă atenuarea rapidă a componentei nucleare (1), care la nivelul mării (1000 g/cm^2) nu mai există. Componenta electrono-fotonică domină la altitudini mari, dar și ea se atenuează rapid, la nivelul mării fiind neînsemnată în comparație cu cea miuonică. La nivelul mării, componenta dominantă este cea miuonică, de 100 de ori mai intensă decât la limita superioară a atmosferei.

Am neglijat contribuția radiațiilor solare la radiația cosmică secundară, deoarece protonii primari produși de aceasta au energii $E < 10 \text{ GeV}$ și aportul lor la intensitatea radiației cosmice secundare este nul la altitudine mică.

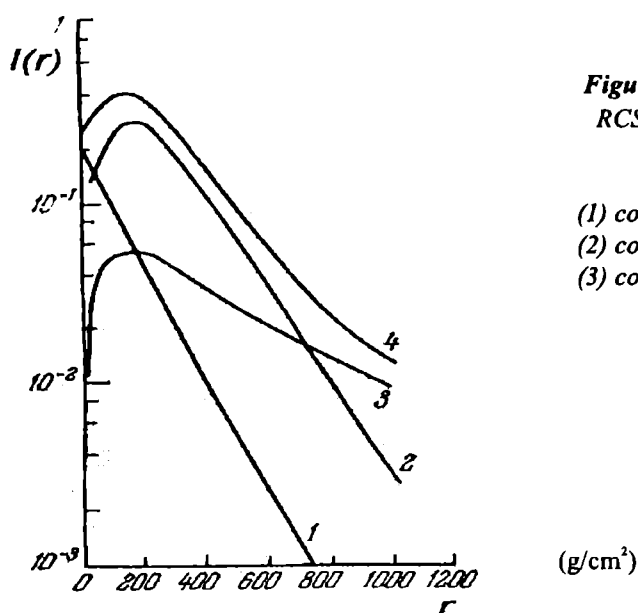


Figura 5.6: Intensitatea diferitelor componente ale RCS date în (particule/cm² .s.ster.) în funcție de drumul parcurs în atmosferă (de la limita superioară a atmosferei) dat în g/cm²:

- (1) componenta nucleară;
- (2) componenta electrono-fotonică;
- (3) componenta miuonică;
- (4) intensitatea totală.

5.3. ORIGINEA RADIAȚIEI COSMICE

La nivelul cunoștințelor actuale și a mijloacelor de studiu nu este posibil să se stabilească exact sursa RCP. Sinteza proprietăților RCP observate experimental a condus, totuși, la anumite concluzii privind originea acestora.

Astfel, structura componentei nucleare a radiației cosmice primare, normată la conținutul în hidrogen, arată că:

- ☐ conține nuclee ușoare (Li, Be, B) de 10⁵ ori mai mult decât este conținut în medie în Univers (și în sistemul solar);
- ☐ raportul ³He / ⁴He este de 300 de ori mai mare decât cel mediu din Univers;
- ☐ nucleele grele au abundență mai mare în RCP decât în Univers.

Se poate presupune că RCP a avut inițial o structură ca aceea din Univers și că a călătorit prin spațiul interstelar (unde densitatea materiei interstelare este $\rho_{\text{int}} \sim 10^{-25}$ g /cm³) înainte de a ajunge la atmosfera terestră un anumit timp. Primele două condiții de mai sus pot fi explicate dacă RCP a traversat și a interacționat cu un strat de materie interstelară cu masa m de câteva grame pe cm². Timpul necesar radiației cosmice primare pentru a străbate, cu viteza $v \equiv c = 3 \cdot 10^8$ m /s, un strat interstelar cu această masă este:

$$t = \frac{h}{c} = \frac{m}{c \cdot \rho} = 10^7 - 10^8 \text{ ani} \quad (5.3.1)$$

Alte observații:

- ☐ în RCP nu s-au descoperit încă antinuclee;
- ☐ conținutul de electroni este ~ 1,5 % din conținutul de nuclee, iar conținutul de pozitroni este ~ 20 % din cel de electroni;

□ spectrul energetic al RCP se întinde pe 14 ordine de mărime în energie și pe 32 ordine de mărime în intensitate, cea mai mare energie observată fiind de $4 \cdot 10^{21}$ eV, adică 60 J /nucleon;

□ forma spectrului $I(E) \sim E^{-2.6}$ nu este caracteristică echilibrului termodinamic: ea nu scade exponențial, ci mult mai lent;

□ distribuția spațială a RCP este izotropă;

□ intensitatea RCP este constantă pe perioade foarte lungi de timp ($\geq 10^9$ ani).

Aceste fapte experimentale susțin ideea că sursa radiației cosmice trebuie să aibă următoarele proprietăți:

■ sursa emite radiații cosmice cu energii până la 10^{22} eV, iar spectrul are aspectul din fig.5.2;

■ energia totală emisă de sursă trebuie să fie de circa 10^{49} ergi/an dacă se află în limitele galaxiei noastre; distribuția RC trebuie să fie izotropă, iar intensitatea RC constantă pe perioade de cel puțin 10^9 ani;

■ spectrul primar trebuie să conțină elemente cu Z până la 100;

■ nu trebuie să conțină antinuclee.

Până în prezent nu s-a găsit un model care să corespundă acestor proprietăți, rămânând în continuare deschise întrebările:

a) De unde vin radiațiile cosmice?

b) Cum se creează radiațiile cosmice?

c) Cum se accelerează radiațiile cosmice?

La aceste întrebări se pot da următoarele răspunsuri posibile:

1) Razele cosmice se pot crea în discul interior de radiație și în haloul galactic (fig. 5.7) sau pot cădea în Galactică din exteriorul ei.

2) În prezent se consideră că supernovele și stelele neutronice pot da radiații cosmice cu proprietățile observate. În galaxia noastră, o supernovă apare la fiecare 300 de ani și s-a estimat că prin evoluția supernovei se eliberează o energie egală cu aproximativ $10^{51} \div 10^{52.5}$ ergi, deci pot da intensitatea radiațiilor cosmice observate ($\sim 10^{49}$ ergi /an).

3) Sursele de RC emit RC cu aceste energii foarte mari, sau RC sunt accelerate în trepte în timpul propagării lor în spațiile interstelare unde există câmpuri magnetice variabile.

Particulele încărcate se accelerează conform teoriei lui Fermi, în câmpurile magnetice variabile aflate în norii turbulenți ai gazelor stelare și în mare cantitate în ramurile spirale ale galaxiei, cu liniile de forță în toate direcțiile, ceea ce explică venirea particulelor din toate direcțiile spre Pământ.

O altă ipoteză privind accelerarea particulelor cosmice se referă la acțiunea câmpurilor electrice rapid variabile din cromosfera solară și a altor stele active.

Supernovele explodează cam una la 300 de ani, dar acest timp este mic în comparație cu timpul cât „hoinăresc” radiațiile cosmice în limitele galaxiei.

Observațiile au arătat că, pe lângă supernove, într-un an explodează și aproximativ 100 de stele noi, iar energia eliberată de ele este de circa 1/10 din energia eliberată de supernove în aceeași perioadă.

S-a mai stabilit că un aport la fluxul general de radiații cosmice ce cad pe Pământ revine particulelor elementare „aruncate” de Soare în timpul exploziilor periodice din cromosferă, dar energiile lor sunt mai mici decât ale celor ce vin din Univers.

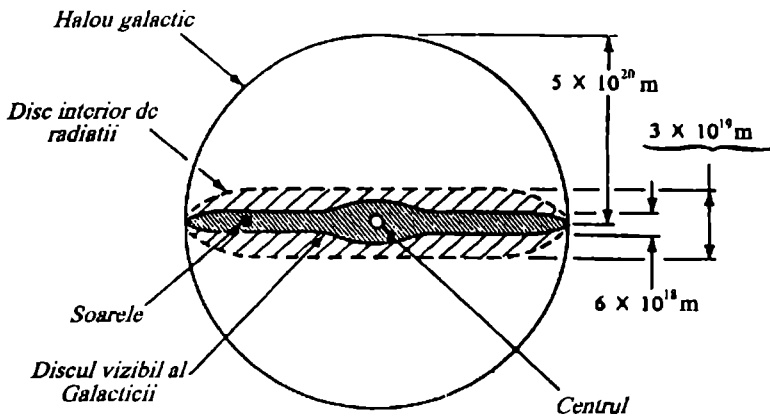


Figura 5.7: Secțiune transversală a Galaxiei noastre

5.4. CENTURILE DE RADIAȚII ALE PĂMÂNTULUI

Laboratoarele de pe sateliți și rachete au pus în evidență fenomene noi cum sunt centurile de radiații (zonele van Allen) care înconjoară Pământul la altitudini mult deasupra limitei superioare a atmosferei. Există două astfel de centuri de radiații cu concentrație mare de particule încărcate (fig.5.8).

Centura interioară este cuprinsă între 500 și 6.000 km iar centura exterioară se întinde între 10.000 și 50.000 de km altitudine. Concentrația de particule în centura exterioară este considerabil mai mare decât cea din centura interioară. S-a stabilit că centura exterioară este formată preponderent din electroni cu energii de $10^4 - 10^5$ eV, iar centura interioară este formată din electroni cu energii de peste 10^6 eV.

Cele mai mari fluxuri de particule au fost înregistrate la 27.000 km de centrul Pământului, și anume:

$\Phi_{\text{electroni}}$ (cu $E_c > 2$ MeV) în zona maximului este aproximativ $5 \cdot 10^5$ particule /cm² sec.

$\Phi_{\text{electroni}}$ (cu $E_c \sim 20 \div 50$ keV) în zona maximului este aproximativ 10^{10} particule /cm² sec., unde E_c este energia cinetică a electronilor. În zonele concentrația particulelor este mult mai mică (aproximativ 0,18 particule /cm² sec sterad) atunci când nu sunt explozii solare.

La înălțimi $h \geq 70.000$ km intensitatea de particule devine constantă și, prin convenție, aceasta se consideră ca fiind *fondul natural de RC*.

Prin frânarea electronilor în materialul de construcție al navelor cosmice care traversează centurile de radiații se generează radiație X foarte intensă, care creează dificultăți de ordin practic privind protecția astronautilor ce vor efectua zboruri spre Lună sau spre alte planete din sistemul nostru solar.

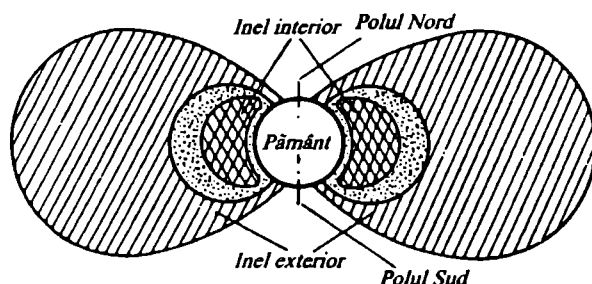


Figura 5.8: Schema structurii coroanei corpusculare a Pământului

Apariția centurii exterioare este explicată pe de o parte prin captura electronilor din RC în câmpul magnetic terestru, unde rămân multă vreme iar pe de altă parte prin injecția de electroni și protoni ce se formează în urma dezintegrării neutronilor generați în atmosfera terestră sub acțiunea RC.

Apariția centurii interioare se presupune a fi o consecință a poluării atmosferei cu produși de fisiune de la exploziile nucleare, produși care sunt β^- - radioactivi; electronii emiși au fost captați de câmpul magnetic terestru și formează centura interioară.

La poli (N și S) nu acționează „capcana magnetică”, a Pământului, deci exploziile nucleare efectuate la poli conduc la împrăștierea particulelor în afară, în spațiul interplanetar.

5.5 DOZE DE IRADIERE DATORATE RC

Fondul natural de radiații generat de RC dă o contribuție importantă la doza anuală încasată de orice locuitor al planetei. Nu există un loc pe planetă unde să nu cadă acest duș cosmic invizibil. Dar, unele părți ale Pământului sunt afectate mai puternic de acțiunea RC de cât altele. Astfel, locuitorii din zonele polare primesc doze mai mari de cât cei de la ecuator datorită câmpului magnetic pământesc care deviază particulele încărcate din RC.

Deasemenea, este important de menționat că nivelul de iradiere crește cu altitudinea, deoarece stratul de aer protector contra RC se micșorează.

Oamenii care locuiesc la nivelul mării primesc anual în medie un echivalent de doză efectiv (EDE) de $\sim 300 \mu\text{Sv}$ în timp oamenii care trăiesc la altitudini de peste 2.000 m primesc anual doze de câteva ori mai mari. Șerpașii care locuiesc pe pantele muntelui Everest la altitudini de ~ 4.000 m primesc un EDE de $0,2 \mu\text{Sv} / \text{h}$.

Echipajele și pasagerii avioanelor sunt supuși în timpul zborului unei iradiieri și mai intense dar de scurtă durată (egală cu timpul de zbor). Astfel, zborul pe liniile aeriene

transcontinentale se face la altitudini care ajung până la 12.000 m iar EDE încasat în timpul zborului de oameni este de $5\mu\text{Sv} / \text{h}$. Reactoarele supersonice efectuează zboruri la altitudini de 20.000 m și chiar mai sus, unde EDE primit de om ajunge la $13\mu\text{Sv} / \text{h}$.

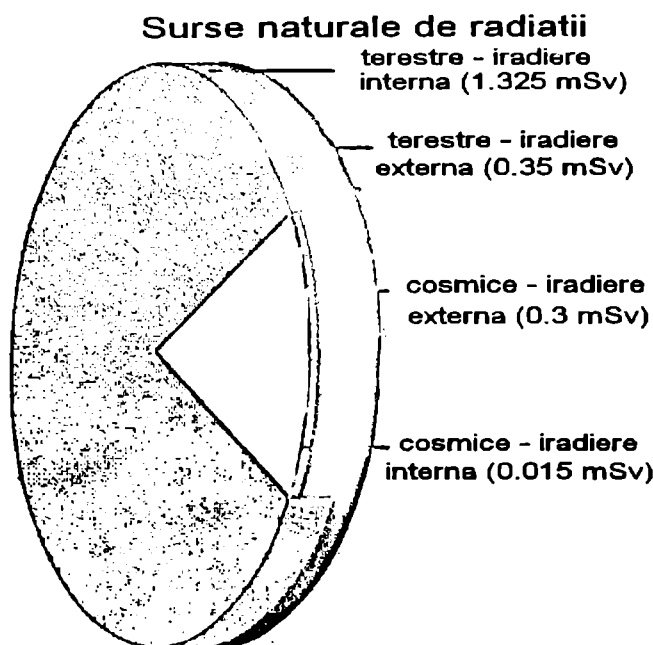


Figura 5.9. EDE mediu anual primit de om pe Pământ de la sursele naturale de radiații terestre și cosmice

EDE mediu anual primit de om pe Pământ de la sursele naturale de radiații terestre și cosmice este de $\sim 2\text{mSv}$ din care $0,65\text{mSv}$ iradiere externă și $1,35\text{mSv}$ iradiere internă (figura 5.9).

Razele cosmice contribuie la *iradierea externă* aproape în aceeași măsură ca și sursele terestre : $EDE_{rc} = 0,30\text{mSv}$. În ce privește *iradierea internă*, contribuția RC este mult mai mică de cât a surselor terestre: $EDE_{rc} = 0,015\text{mSv}$.

CAPITOLUL 6

IZOTOPI RADIOACTIVI NATURALI (IRN)

După originea lor, izotopii radioactivi naturali (IRN) sunt de două tipuri: izotopi radioactivi naturali *de origine terestră* și izotopi radioactivi naturali *de origine cosmogenă*.

6.1. IZOTOPI RADIOACTIVI NATURALI DE ORIGINE TERESTRĂ

În categoria IRN de origine terestră intră acei izotopi care s-au format odată cu toate celelalte elemente chimice de pe Pământ. Deși sunt radioactivi nu s-a dezintegrat integral deoarece acești izotopi au perioada de înjumătățire $T_{1/2}$ foarte mare, comparabilă (sau chiar mai mare) cu vârsta Pământului, care este estimată la aproximativ 10^9 ani.

Viteza lor de dezintegrare fiind foarte lentă rezervele inițiale de astfel de IRN s-au redus, dar nu s-au epuizat. Astfel, ei sunt și astăzi prezenți pe planetă, fiind răspândiți în diversele componente ale mediului, în concentrații variabile dar încă măsurabile, în atmosferă, sol, ape, organisme vii, etc.

Sursa primară terestră a acestor IRN o constituie scoarța terestră sau, mai exact, rocile stâncoase de unde, prin erodare și transport (eolian și acvatic), sunt continuu antrenate spre alte zone ale planetei și intră în marele circuit al IR din biosferă.

IRN cu cea mai mare contribuție la radioactivitatea naturală a mediului sunt: ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th , care sunt capi de serie pentru trei serii radioactive naturale, și încă doi IR cu răspândire mare în mediu: ^{40}K și ^{87}Rb . De asemenea, există încă o grupă foarte numeroasă de IRN a căror contribuție globală la radioactivitatea mediului este mai mică decât a celor cinci IRN enumerați mai sus. Cauza acestei radioactivități slabe o constituie fie concentrația foarte mică în scoarța a IR, fie perioada lor de înjumătățire extrem de mare ($\gg 10^9$ ani).

În tabelul 6.1. sunt date concentrațiile medii ale celor mai importanți IRN din scoarța terestră, abundența lor izotopică în elementul chimic, precum și câteva caracteristici ale dezintegrării lor radioactive:

Tabelul 6.1: Concentrațiile principalilor IRN în scoarța Pământului și date despre dezintegrarea lor.

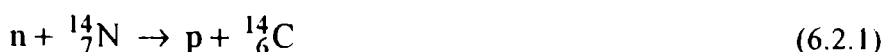
IRN	Concen- trația medie (%)	Abundența izotopică (%)	Tip de dezintegrare	Nuclee fiică	$T_{1/2}$ (ani)
^{40}K	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	β, γ	$^{40}\text{Ca}, ^{40}\text{Ar}$	$1,3 \cdot 10^9$
^{87}Rb	$8,4 \cdot 10^{-3}$	27,85	β, γ	^{87}Sr	$4,8 \cdot 10^{10}$
^{232}Th	$8 \cdot 10^{-4}$	100	α, β, γ	$^4\text{He}, ^{208}\text{Pb}$	$1,39 \cdot 10^{10}$
^{235}U	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,71	α, β, γ	$^4\text{He}, ^{207}\text{Pb}$	$7,13 \cdot 10^8$
^{238}U	$3 \cdot 10^{-4}$	99,28	α, β, γ	$^4\text{He}, ^{206}\text{Pb}$	$4,5 \cdot 10^9$
^{48}Ca	$6,6 \cdot 10^{-3}$	0,185	β	^{48}Ti	$1,1 \cdot 10^{18}$
^{96}Zr	$7,8 \cdot 10^{-4}$	2,8	β	^{96}Mo	$3,6 \cdot 10^{17}$
^{115}In	$9,6 \cdot 10^{-6}$	95,77	β	^{115}Sn	$5,1 \cdot 10^{14}$
^{124}Sn	$1,42 \cdot 10^{-4}$	6	β	^{124}Te	$1,5 \cdot 10^{17}$
^{130}Te	$3,5 \cdot 10^{-7}$	34,49	β	^{130}Xe	$2 \cdot 10^{21}$
^{138}La	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	β, CE	$^{138}\text{Ce}, ^{38}\text{Ba}$	$1,1 \cdot 10^{11}$
^{144}Nd	$4,8 \cdot 10^{-4}$	23,87	α	$^4\text{He}, ^{140}\text{Ce}$	$2,1 \cdot 10^{15}$
^{147}Sm	$1,2 \cdot 10^{-4}$	15,07	α	$^4\text{He}, ^{143}\text{Nd}$	$1,1 \cdot 10^{11}$
^{176}Lu	$2,6 \cdot 10^{-6}$	2,6	β	$^{176}\text{Hf}, ^{176}\text{Y}$	$3,6 \cdot 10^{10}$
^{187}Re	$6,3 \cdot 10^{-8}$	62,9	β	^{187}Os	$4 \cdot 10^{10}$
^{209}Bi	10^{-5}	100	α	$^4\text{He}, ^{205}\text{Tl}$	$2 \cdot 10^{18}$

În categoria IRN de origine terestră intră o serie de IR rezultați din dezintegrarea în lanț cu formarea de serii radioactive ale izotopilor ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th . Concentrațiile actuale ale fiecăruia dintre acești IRN în scoarța terestră sunt condiționate de concentrațiile capului de serie corespunzător fiecărui izotop radioactiv, de viteza sa de producere prin dezintegrările succesive ce au loc de la capul de serie până la el și de viteza sa de dezintegrare așa cum a fost descris în capitolul 2, la dezintegrările în lanț. Acești IRN secundari dau o contribuție importantă la radioactivitatea naturală a mediului.

6.2. IZOTOPI RADIOACTIVI NATURALI DE ORIGINE COSMOGENĂ

Mecanismul de apariție a IRN de origine cosmogenă este legat de faptul că radiațiile cosmice ajunse în atmosferă interacționează cu nucleele atomice și formează un număr mare de neutroni. Neutronii participă la reacții nucleare cu azotul, oxigenul și alte elemente din atmosferă, formând IR relativ ușori în aer.

Astfel, o reacție cu cel mai mare randament este captura neutronului (n) de către atomul de azot:



la care randamentul de producere a izotopului radioactiv ^{14}C este de aproximativ 100 nuclee / (minut 1 kg aer).

Un alt mecanism de producere a IRN este cel al reacțiilor nucleare produse de protonii din radiația cosmică cu nucleele din atmosferă. Izotopul radioactiv de beriliu este generat într-o astfel de reacție:



Într-o coloană de aer cu secțiunea de un cm^2 se formează aproximativ 3000 atomi de ^7Be în 24 de ore.

Alte nuclee radioactive se formează în urma fisiunii nucleelor atomilor atmosferici sub acțiunea radiației cosmice, ca în cazul izotopului sulfului ^{35}S , sau prin reacții de captură ale miuonilor, ca în cazul izotopului clorului ^{39}Cl :



IR de origine cosmogenă au perioade de înjumătățire relativ scurte, după cum se observă în tabelul 6.2 de mai jos și ei sunt generați continuu și se dezintegrează continuu, contribuind la „radioactivitatea naturală” a atmosferei, deci și la iradierea populației de pe Pământ.

*Tabelul 6.2: Perioadele de înjumătățire ale unor
IRN de origine cosmogenă*

IR	Perioada de înjumătățire
^3H	12,46 ani
^7Be	52,9 zile
^{10}Be	$2,5 \cdot 10^6$ ani
^{14}C	5568 ani
^{22}Na	2,6 ani
^{32}P	14,3 zile
^{33}P	25,4 zile
^{35}S	87,1 zile
^{39}Cl	55,5 minute

În tabelul 6.2 sunt dați principalii IR de origine cosmogenă, cu caracteristicile lor de producere și de dezintegrare.

Calcululele arată că prin interacțiunea radiației cosmice cu azotul din atmosferă se formează anual o cantitate de ^{14}C egală cu 10 kg, iar cantitatea totală de ^{14}C din atmosferă este de circa 80 tone. Numărul de atomi de ^{14}C care se formează într-o coloană atmosferică cu aria de un cm^2 în timp de o secundă este $i = 2,6$ atomi / cm^2 secundă. Evaluarea cantității de ^{14}C produsă într-un an s-a făcut admitând că există un echilibru între viteza cu care se produce acest IRN și viteza sa de dispariție:

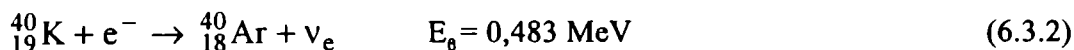
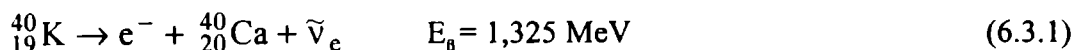
$$i \cdot S = N \cdot \lambda_c \quad (6.2.4)$$

unde: S = suprafața Pământului ($S = 5,1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$)

λ_c = constanta de dezintegrare a ^{14}C

6.3. PROPRIETĂȚI FIZICE ȘI BIOCHIMICE ALE IRN CARE NU FAC PARTE DIN FAMILIILE RADIOACTIVE

Potasiul (^{40}K) are două moduri de dezintegrare: β^- și captura electronică (CE), însoțită și de emisie de raze γ .



$$E_\gamma = 1,461 \text{ MeV}$$

Din rapoartele concentrațiilor ^{40}K și a descendenților săi: $C(^{40}\text{K}) / C(^{40}\text{Ca})$ și respectiv $C(^{40}\text{K}) / C(^{40}\text{Ar})$ s-a determinat vârsta scoarței Pământului (egală cu $5 \cdot 10^9$ ani în primul caz și cu $5,3 \cdot 10^9$ ani în cel de-al doilea). Potasiul este un element chimic alcalin fără de care nu poate exista viața plantelor și animalelor. Conținutul de potasiu în plante variază între $3 \div 6\%$, în funcție de tipul plantei. La animale și la om, potasiul se concentrează în mușchi și mai mult în perioada când aceștia sunt în acțiune decât în cea de repaus. Conținutul de potasiu într-un organism viu depinde de vârsta organismului. În perioada tânără, când organismul este în creștere (organismul plantei, al animalului sau al omului), concentrația de potasiu este mai mare decât în perioada în care organismul a îmbătrânit. La plante se observă o diferență de concentrație a potasiului pentru diversele ei părți: părțile tinere conțin mai mult potasiu decât părțile bătrâne. În corpul omului adult, conținutul de potasiu este de aproximativ $0,2\%$. Cunoscând concentrația de potasiu natural în organismul uman ($C_K = 0,2\%$) și abundența izotopică a ^{40}K , se poate estima contribuția acestui izotop la radioactivitatea unui om adult cu masa $M = 70 \text{ kg}$. Se calculează mai întâi activitatea specifică Λ_s pentru un gram de ^{40}K :

$$\Lambda_s = \frac{\Lambda}{m} = \frac{\lambda \cdot N}{m} = \frac{\lambda \cdot N_A}{A} \quad (6.3.3)$$

$$\Lambda_s = \frac{0,693 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{40} \cdot \frac{1}{T_{1/2}} = 2,44 \times 10^5 \text{ Bq/g} \quad (6.3.4)$$

Corpul uman cu masa $M = 70 \text{ kg}$ conține cca 160 g potasiu natural ceea ce corespunde la o cantitate de ^{40}K egală cu

$$m = 160 \cdot 1,19 \cdot 10^{-4} = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ g } (^{40}\text{K}) \quad (6.3.5)$$

Activitatea Λ a corpului uman cu masa $M = 70 \text{ kg}$ va fi

$$\Lambda = m \cdot \Lambda_s = 4,6 \cdot 10^3 \text{ Bq} \quad (6.3.6)$$

Datorită izotopului radioactiv natural ^{40}K pe care orice organism viu (de la cel mai simplu până la cel mai complex) îl acumulează în anumite proporții, organismul respectiv este caracterizat de o radioactivitate naturală proprie, caracterizată prin activitatea specifică Λ_s (^{40}K) sau prin activitatea globală $\Lambda(^{40}\text{K})$ a întregului corp, generată de izotopul ^{40}K . Activitatea

generată de izotopul ^{40}K poate fi determinată măsurând fie radiațiile β , fie radiațiile γ emise de eșantioane (preferabil de la plante sau animale), fie de întregul corp în cazul omului (cu contorul de care uman).

Concentrația de ^{40}K în corpul uman este mult mai mare decât cea existentă în factorii de mediu (aer, apă, sol), deci și activitatea specifică medie a corpului uman generată de ^{40}K ($\Lambda_s \sim 57 \text{ Bq / kg}$) este mai mare decât cea a factorilor de mediu. S-a estimat că echivalentul de doză efectiv (EDE) anual pentru un om adult, datorat iradierii interne cu ^{40}K , ajunge până la $165 \mu\text{Sv / an}$.

Rubidiul (^{87}Rb) este un element alcalin, cu proprietăți asemănătoare cu cele ale potasiului. Izotopul $^{87}_{37}\text{Rb}$ se dezintegrează β^- ($E_\beta = 0,272 \text{ MeV}$) și trece în $^{87}_{38}\text{Sr}$.

Rubidiul nu formează minerale proprii, dar tinde să înlocuiască potasiul în mineralele de potasiu și cesiul în mineralele de cesiu. Perioada de înjumătățire a izotopului radioactiv natural ^{87}Rb este mult mai mare decât timpul geologic. În timpul întregii istorii a scoarței Pământului s-a dezintegrat o parte infimă din el. Dezintegrarea β^- a ^{87}Rb în ^{87}Sr se folosește cu succes la determinarea vârstei mineralelor. Se presupune că aproximativ $0,5 \div 1 \%$ din stronțitul stabil din scoarța Pământului este de origine radiogenă.

Rubidiul are proprietăți chimice asemănătoare cu cele ale potasiului. Se poate deduce de aici că rolul biologic și caracterul distribuției lui în organism sunt identice cu cele ale potasiului. Totuși, între Rb și K s-au observat și fenomene de antagonism ionic, de unde apare efectul benefic al potasiului la otrăvirea animalelor cu doze mari de Rb. Rubidiul se acumulează în special în țesutul muscular și în cantități mai mici în alte organe și țesuturi. Conținutul de Rb (și deci a IRN) este mai mare în mușchii de la aripile păsărilor decât în mușchii animalelor, în mușchii bărbaților decât în mușchii femeilor (în medie!).

Activitatea totală a corpului omenesc adult cu masa $M = 70 \text{ kg}$ generată de ^{87}Rb este estimată la:

$$\Lambda_{\text{tot}}^{\text{om}}(^{87}\text{Rb}) \sim 10^{-8} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^2 \text{ Bq} \quad (6.3.7)$$

Carbonul natural (^{12}C) conține doi izotopi stabili: ^{12}C (98,89%) și ^{13}C (1,11 %) și extrem de puțin din izotopul radioactiv ^{14}C ($1,8 \cdot 10^{-10} \%$).

Importanța carbonului în dezvoltarea vieții organice este esențială: el reprezintă componenta de bază a celor mai importante formațiuni structurale ale plantelor și animalelor și joacă un rol de frunte în procesele de schimb.

Astfel, un gram de carbon natural are activitatea specifică $\Lambda_s(\text{C}) = 0,02 \text{ Bq}$ generată de ^{14}C .

Izotopul ^{14}C se dezintegrează β^- cu $E_\beta = 0,155 \text{ MeV}$ și trece în $^{14}_7\text{N}$.

Izotopul ^{14}C format în straturile superioare ale atmosferei se combină cu oxigenul și formează bioxidul de carbon $^{14}\text{CO}_2$, care intră în circuitul geochimic obișnuit al carbonului. Atmosfera este rezervorul de ^{14}C . Plantele absorb carbonul (deci și ^{14}C) din aer prin asimilație, omul și animalele si-l însușesc prin hrana vegetală și apă. Astfel, ^{14}C intră în structura materiei vii, cu aceeași abundență izotopică în elementul chimic carbon care există și în carbonul atmosferic și care este rezultatul echilibrului dintre viteza de producere și de dispariție a acestui izotop.

În corpul omului matur, carbonul reprezintă numai 18 % din greutatea totală și, pentru un individ cu masa $M = 70 \text{ kg}$, activitatea totală a corpului generată de izotopul radioactiv natural ^{14}C este:

$$\Lambda_{\text{tot}}(^{14}\text{C}) = 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ci} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Bq} \quad (6.3.8)$$

Activitatea specifică generată de ^{14}C variază de la o specie la alta, iar în limitele unui organism (la om, de exemplu) variază de la un organ la altul, după cum variază și concentrația elementului carbon în organul respectiv.

Deoarece izotopul radioactiv ^{14}C se formează în atmosferă și este asimilat de substanța organică, el servește pentru determinarea vârstei unor descoperiri arheologice. Metoda se bazează pe ipoteza că, pe perioade mari de timp, abundența ^{14}C în atmosferă a rămas neschimbată și pe faptul că, în orice organism viu abundența izotopică a ^{14}C este aceeași, datorită schimbului permanent cu carbonul din atmosferă. Odată ce organismul (plantă, animal, om) moare, schimbul cu atmosfera încetează și conținutul de ^{14}C scade datorită dezintegrării radioactive. Deci, activitatea specifică generată de ^{14}C a unei probe de lemn dintr-o relicvă diferă de activitatea specifică a unei probe de lemn proaspăt tăiat, după legea:

$$\Lambda_S^{\text{relicvă}} = \Lambda_S^{\text{lemn proaspăt}} \cdot e^{-\lambda_c \cdot t_v} \quad (6.3.9)$$

unde t_v este vârsta relicvei.

Trebuie remarcat însă faptul că, de-a lungul vremurilor, concentrația de ^{14}C în atmosferă a suferit mici oscilații, puse în evidență prin compararea vârstelor unor obiecte determinate cu ^{14}C și apoi cu alte metode radioactive. Aceste oscilații se explică prin schimbarea câmpului magnetic terestru, schimbare care a produs modificarea fluxului de radiație cosmică și deci viteza de formare a ^{14}C în atmosferă.

O anumită micșorare a concentrației de ^{14}C în ultimul secol se explică prin dezvoltarea industriei și crearea marilor orașe care au impus un consum intens de combustibili fosili (petrol, cărbune). Ca rezultat, în aer au pătruns mari cantități de CO_2 sărăcit în ^{14}C datorită dezintegrării radioactive.

Tritiul (^3_1H), izotopul radioactiv al hidrogenului, este de origine cosmogenă și este produs în urma interacției radiațiilor cosmice (în special neutroni și protoni) cu atomii din atmosferă (azot sau oxigen). Radiațiile corpusculare solare contribuie de asemenea la producerea tritiului prin interacții cu aerul atmosferic. Se dezintegrează β^- cu $E_{\beta^-} = 18 \text{ keV}$, are perioada de înjumătățire $T_{1/2} = 12,26 \text{ ani}$ și nu emite raze γ .

Randamentul de formare a tritiului sub acțiunea radiației cosmice este de ordinul $(0,2 \div 0,4) \text{ atomi}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. S-a evaluat cantitatea totală de tritiu de origine cosmogenă din atmosferă, care nu depășește un kg, iar în întreaga biosferă nu depășește două kg. În substanță, tritiul este greu de identificat datorită concentrației foarte mici. În schimb, precipitațiile atmosferice sunt mai bogate în acest izotop.

Concentrația tritiului în diverse ape ale Terrei (apa de ploaie, apa râurilor, a mărilor și oceanelor, etc.) variază între $(0,4 \div 8) \cdot 10^{-8} \text{ atomi de tritiu la un atom de hidrogen}$.

Hidrogenul este o componentă de bază a organismelor vii care-l asimilează în special prin consumul de apă. Izotopul său radioactiv (tritiul) are același rol biologic ca și izotopii stabili ai hidrogenului ^1_1H și ^2_1H . Dar, ca și în cazul izotopului ^2_1H , concentrații mari de tritiu în apă dau o toxicitate chimică pentru organismul uman.

Radiațiile β emise de tritiu au o energie extrem de redusă (~ 18 keV), deci tritiul are o toxicitate radioactivă moderată.

Radioactivitatea corpului omenesc condiționată de prezența tritiului este evaluată pentru un om standard cu masa $M = 70$ kg, ca fiind:

$$\Lambda^{\text{om}}(^3\text{H}) \sim 10^{-10} \text{ Ci} = 3,7 \text{ Bq} \quad (6.3.10)$$

Calciul (^{40}Ca) este un element chimic destul de răspândit în natură. Izotopul ^{40}Ca cu abundența sa izotopică destul de mare (10,18 %) este de asemenea prezent în cantități relativ mari în mediu. El suferă o dezintegrare β^- cu $E_\beta = 0,281$ MeV și o dezintegrare $\beta^-\beta^-$ (β^- dublă, fără neutrino), cu energia de dezintegrare de 4,27 MeV, având o perioadă de înjumătățire foarte mare.

În natură, calciul se întâlnește mai ales sub formă de carbonați, sulfati sau fosfați de calciu.

Calciul este un element chimic absolut necesar proceselor normale ale vieții. La om, calciul este o componentă de bază pentru sistemul osos, dar este conținut și în alte țesuturi și lichide din organism. Conținutul total de calciu în corpul omenesc este de 1,5 %, astfel că, un om standard cu masa de 70 kg are în corpul său cam un kg de calciu, din care mai mult de 98 % este în schelet. Un om adult are nevoie zilnic de $0,7 \div 1,1$ g Ca. Organismele în creștere și femeile care alăptează au nevoie de cantități mai mari de calciu. Omul, la fel ca și animalele, primește calciul din apă și hrană sub formă de compuși organici și minerali, iar plantele iau calciul din sol.

Radioactivitatea corpului uman standard datorită izotopului radioactiv natural ^{40}Ca este foarte mică deoarece acest izotop are perioada de înjumătățire $T_{1/2}$ foarte mare:

$$\Lambda^{\text{om}}(^{40}\text{Ca}) = 7 \cdot 10^{-13} \text{ Ci} = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Bq} \quad (6.3.11)$$

De asemenea, contribuția acestui izotop radioactiv la radioactivitatea biosferei este neglijabilă.

Zirconiul natural (^{90}Zr) are o răspândire mare în scoarța terestră (2,8 %) și o abundență relativ mare a izotopului radioactiv natural ^{90}Zr ($\sim 2,8$ %). Totuși, din punct de vedere al igienei radiațiilor, el nu este interesant datorită perioadei de înjumătățire foarte mari a izotopului radioactiv ^{90}Zr .

Astfel, un gram de zirconiu natural are o activitate: $\Lambda_g \sim 10^{-14} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ Bq/g}$.

În organismul mamiferelor (deci și la om), el se fixează în oase, fără a avea un rol biologic cunoscut.

Indiul natural (^{115}In) conține 95,67 % din izotopul radioactiv ^{115}In , care este β radioactiv, cu energia $E_\beta = 0,63$ MeV și are perioada de înjumătățire $T_{1/2} = 6 \cdot 10^{14}$ ani.

Concentrația medie în scoarță a indiului este de numai 10^{-5} % în greutate și nu există zăcămintele minerale din acest element. Indiul intră în amestec în structura unui număr mare de minerale, dar în concentrații foarte mici (sub 0,1 %), fiind de fapt un „element chimic împrăștiat”.

Indiul este larg utilizat în industrie, dar se poate extrage doar în cantități mici (de exemplu, în SUA în 13 ani s-au extras numai 40 tone de indiul !).

Despre rolul indiului în procesele biologice nu se știe prea multe. Interesul pentru impactul izotopului radioactiv natural ^{115}In asupra omului și al mediului este datorat prelucrării industriale a mineralelor care conțin indiul, dar activitatea sumă implicată în biogenează este foarte mică.

Activitatea specifică a indiului natural este:

$$\Lambda_S(\text{In}^{\text{nat}}) = 4,8 \cdot 10^{-12} \text{ Ci/g} = 1,8 \cdot 10^2 \text{ Bq/kg} \quad (6.3.12)$$

O situație similară, cu activitate specifică foarte mică a elementului natural, se întâlnește practic la toți ceilalți izotopi radioactivi naturali, menționați în tabelul 6.1. sau nementionați, dar care au perioade de înjumătățire mult mai mari decât timpul geologic. Contribuția lor globală la radioactivitatea mediului și la procesele de biogenează este neglijabilă în comparație cu a celorlalți izotopi radioactivi naturali.

Beriliul (^7Be sau ^{10}Be) care se formează în atmosferă, poate forma compuși de tipul BeO sau $\text{Be}(\text{OH})_2$. Aceste molecule difuzează în aerul atmosferic până când se atașează la particule de aerosoli sau la picături de ploaie împreună cu care cad apoi pe pământ. Ajungând în straturile joase ale atmosferei și pe sol, beriliul intră prin lanțurile alimentare în procesele de schimb ale organismelor vegetale și animale.

Organele în care beriliul se acumulează de preferință la animale și om sunt oasele, ficatul, rinichii și mușchii. Eliminarea se face prin urină și excreție.

6.4. PROPRIETĂȚI ALE UNOR IRN DIN FAMILIILE RADIOACTIVE

Uraniul se găsește în natură în special sub formă de pehblendă (U_3O_8) și fosfați, într-o concentrație medie relativ mare ($4 \cdot 10^{-4}$ %). Uraniul are trei izotopi, cu numerele de masă $A = 234$ (^{234}U), $A = 235$ (^{235}U) și $A = 238$ (^{238}U), dar preponderent este izotopul ^{238}U care are abundența izotopică 99,28 %, urmat de izotopul ^{235}U care are abundența în element de 0,71 %.

Uraniul se găsește în natură fie absorbit în minerale și soluri, fie sub formă de soluție în mediul acvatic. Cea mai mare concentrație de uraniu se află în rocile de munte, care sunt și surse primare de uraniu în biosferă. Concentrații mai mari de uraniu se află în rocile acide (granitice), în timp ce în rocile bazice (bazaltice), uraniul se află în concentrații mai mici. Se estimează că în straturile superioare ale scoarței Pământului se află $\sim 10^{15}$ tone de uraniu.

Uraniul se găsește și în apele râurilor, în mări și oceane, provenind din rocile muntoase prin erodare și transport. În apele oceanice concentrația medie de uraniu este $\sim 10^{-6}$ g/l, iar cantitatea totală de uraniu în oceane este estimată la $\sim 10^{10}$ tone. Uraniu se găsește și în organisme vegetale și animale, dar rolul său biologic nu este cunoscut.

Izotopii ^{235}U și ^{238}U au perioadele de înjumătățire comparabile cu vârsta geologică a Pământului, se dezintegrează α și fiecare dintre ei este cap de serie pentru un șir de dezintegrări în lanț (figurile 6.1 și 6.3).

Descendenții celor doi izotopi de uraniu emit, la rândul lor, radiații α , β , γ , care contribuie la radioactivitatea mediului înconjurător. Deși au perioade de înjumătățire mult mai mici decât vârsta geologică a Pământului, ei există în cantități măsurabile deoarece sunt produși continuu prin dezintegrarea nucleului de uraniu-părinte. În anumite condiții se stabilește chiar echilibrul radioactiv între ^{235}U , ^{238}U și descendenții lor.

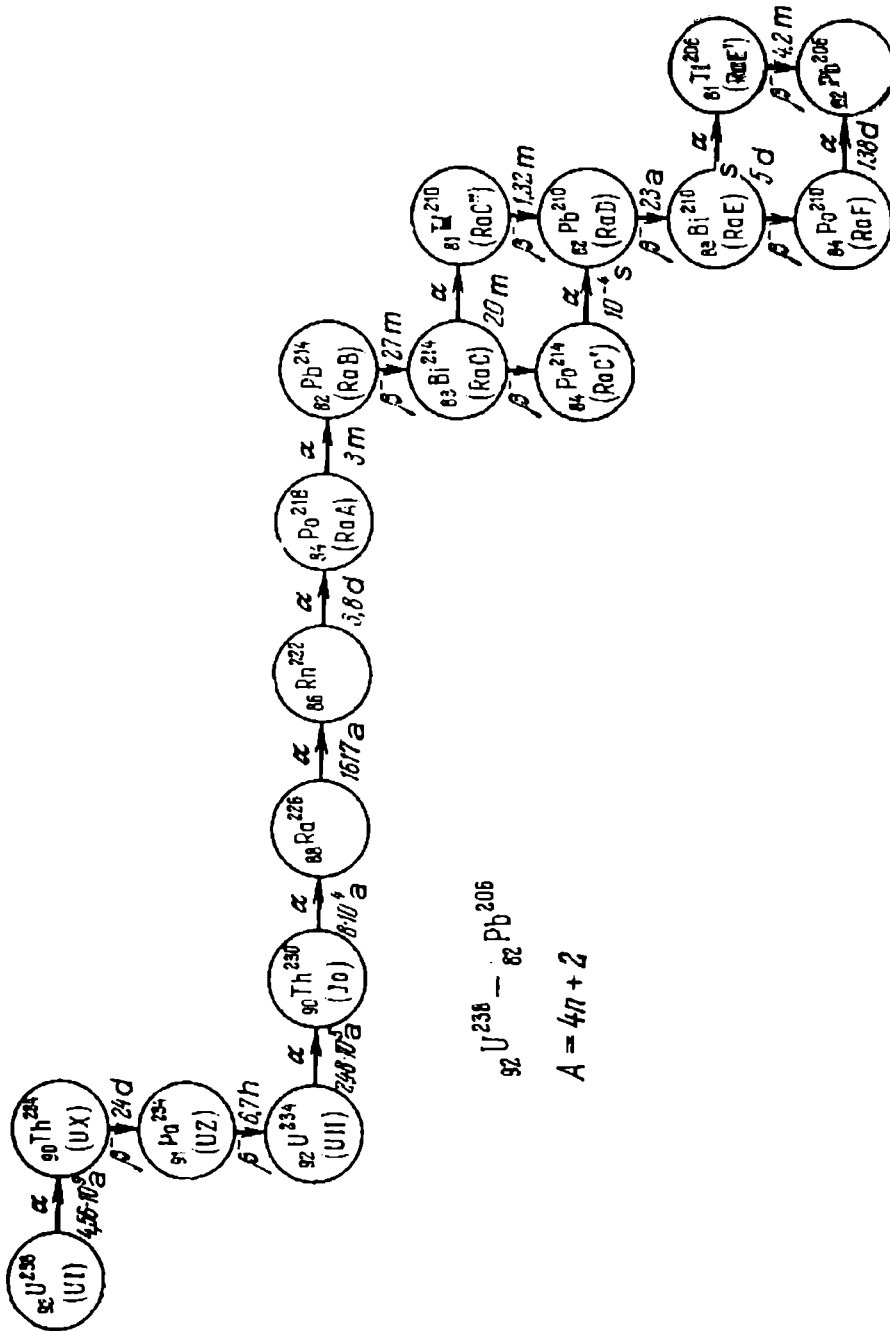


Figura 6.1: Dezintegrarea în lanț a ^{238}U (seria uraniului)

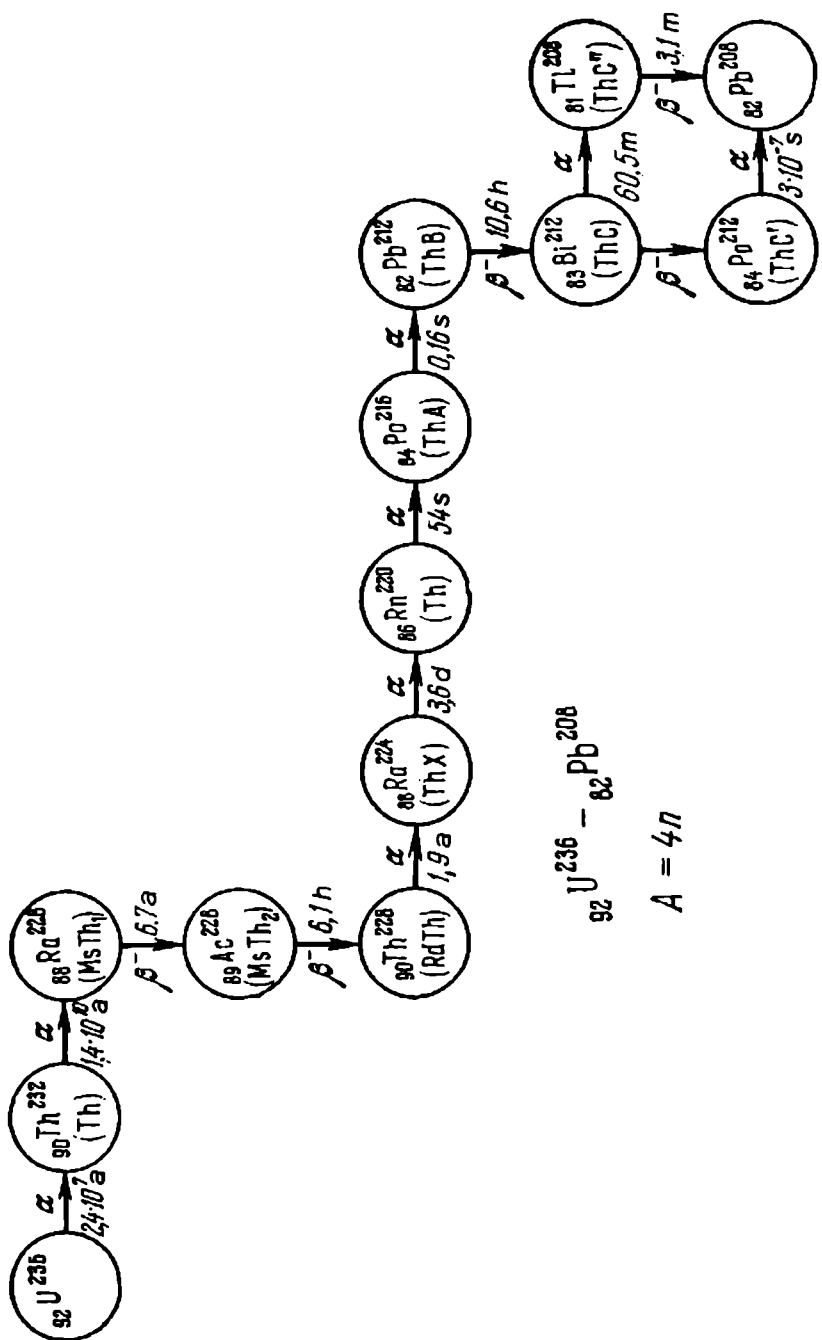


Figura 6.2: Dezintegrarea în lanț a ^{238}U (seria uraniu-toriu)

Dintre descendenții uraniului, cei mai remarcabili prin impactul lor asupra radioactivității mediului sunt radiul și radonul, care măresc radiotoxicitatea uraniului prezent în organismul viu.

O altă proprietate fizică importantă a izotopilor de uraniu cu impact asupra radioactivității mediului este capacitatea acestora de a fisiona spontan sau în interacție cu neutronii. Procesul de fisiune însuși este sursă de neutroni, de IR rezultați din fragmentarea nucleului de uraniu și de energie nucleară.

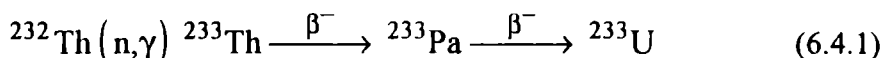
Uraniul este combustibilul utilizat pe scară largă în producerea de energie electrică în centralele nucleare-electrice și ridică serioase probleme privind protecția omului și a mediului înconjurător. Dacă amintim și faptul că uraniul este folosit în construirea bombelor atomice, vom avea o imagine mai completă asupra diverselor căi prin care acest element natural poate afecta calitatea mediului din punct de vedere al igienei radiațiilor.

Thoriul (^{232}Th), ca și uraniul, se găsește larg răspândit în natură, în special în roci granitice, sub formă de ThSiO_4 sau ThO_2 , cu o concentrație medie de $8 \cdot 10^{-4} \%$, cam de patru ori mai mare decât cea a uraniului. Thoriul nu se dizolvă și nu formează minerale solubile.

Izotopul radioactiv ^{232}Th are abundența izotopică $\sim 100 \%$ și se dezintegrează α cu $E_\alpha = 4,01 \text{ MeV}$ și $3,96 \text{ MeV}$. Perioada sa de înjumătățire este $T_{1/2} = 1,39 \cdot 10^{10}$ ani, astfel încât thoriul chimic pur are o activitate specifică $\Lambda_s(\text{Th}) = 4,1 \cdot 10^6 \text{ Bq/kg}$.

Izotopul ^{232}Th este capul de serie al celei de a treia serii radioactive naturale (figura 6.2). Are mai puțini descendenți decât uraniul, iar perioada sa de înjumătățire este mai mare decât cea a uraniului, deci radiotoxicitatea lui este mai mică decât a uraniului. Între descendenții thoriului remarcăm, ca și în cazul uraniului, radiul (^{226}Ra) și radonul (^{222}Rn) numit și thoron.

Thoriul este un material de perspectivă pentru obținerea unui alt combustibil nuclear ^{233}U . Prin iradierea cu neutroni a ^{232}Th se formează izotopul ^{233}Th , care prin dezintegrări β^- în lant conduce la ^{233}U :



Izotopul ^{233}U , ca și ^{235}U , fisionează cu neutroni termici, deci poate fi folosit în centralele nucleare. Thoriul este mai puțin toxic decât plutoniul (alt combustibil nuclear), deci va fi preferat acestuia.

Zăcămintele de thoriu există (India, Brazilia, etc.), mineralul de bază pentru extragerea thoriului fiind monazita, un amestec de fosfat de uraniu și silicat de thoriu.

Radiul - Cei trei izotopi radioactivi ai radiului (^{223}Ra , ^{224}Ra și ^{226}Ra) provin din cele trei serii naturale și se dezintegrează α conform datelor din tabelul 6.3.

Tabelul 6.3: Date despre dezintegrarea izotopilor de Ra

IR	Seria	$T_{1/2}$	Energia (MeV)	Descendent
^{226}Ra	^{238}U	1599 ani	4,78 (94,6 %) 4,60 (5,4 %)	^{222}Rn
^{224}Ra	^{232}Th	3,66 zile	5,69 (95 %) 5,45 (5 %)	^{220}Rn
^{223}Ra	^{235}U	11,4 zile	5,72 (54 %) 5,61 (36 %) 5,54 (9 %) 5,50 (1 %)	^{219}Rn

Concentrația medie a radiului în scoarță este de $4 \cdot 10^{-10} \%$

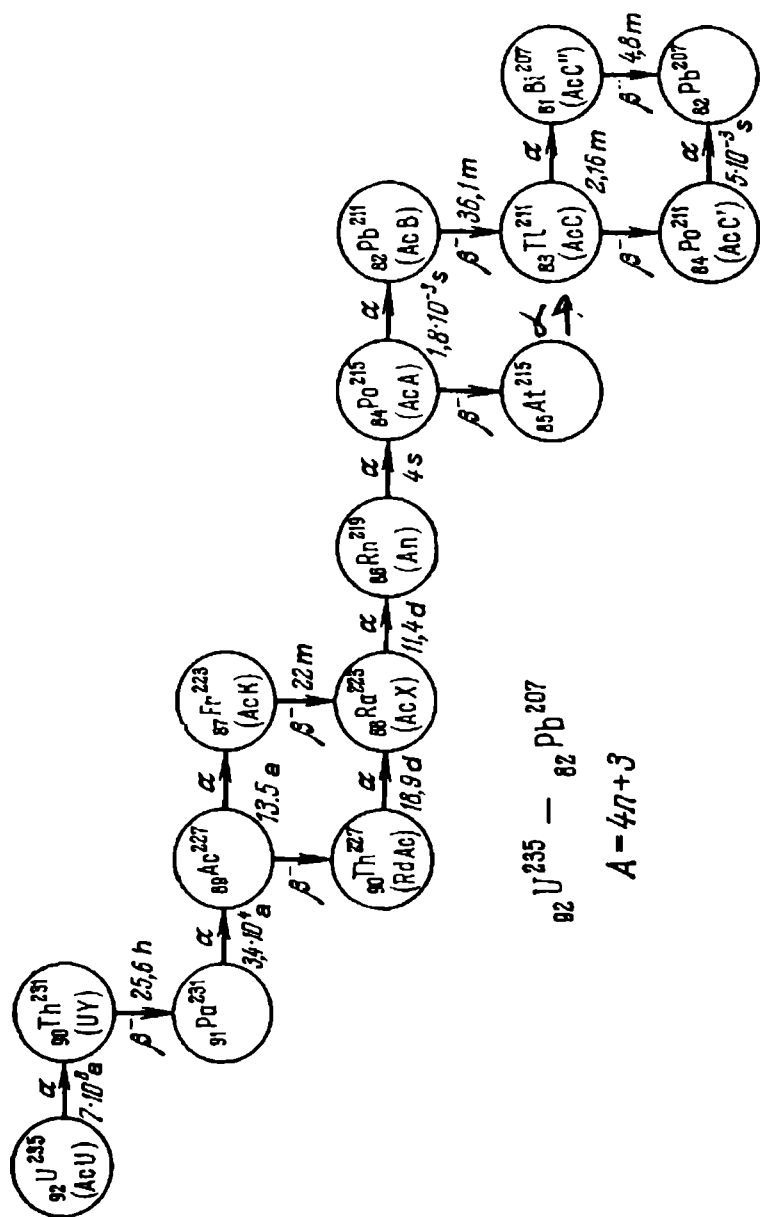


Figura 6.3: Dezintegrarea în lanț a ^{235}U .

Fiind descendent al uraniului și al thoriului, radiul se găsește pretutindeni unde există aceste două elemente: în roci ($10^{-9} \div 10^{-10} \%$), în sol ($10^{-10} \div 10^{-11} \%$), în apele planetare ($10^{-12} \div 10^{-14} \%$), în plante ($10^{-12} \%$), în animale ($10^{-13} \%$), în organismul uman ($5 \cdot 10^{-4} \text{ g Ra} / 1 \text{ g cenușă}$), dar concentrația sa variază foarte mult de la un caz la altul. Astfel, în rocile de munte, concentrația sa este între 10^{-13} și $10^{-11} \text{ g Ra} / 1 \text{ g rocă}$, în oceane variază între $(0,7 \div 7) \cdot 10^{-14} \text{ g Ra} / \text{litru}$. În izvoarele minerale și în cele fierbinți concentrația de radium crește simțitor (până la valori de aproximativ $10^{-6} \text{ g} / \text{l}$). Există ape minerale care au un conținut relativ mare de radium și care, într-o vreme, când cunoștințele despre efectele radiațiilor asupra substanței vii erau ca și inexistente, erau preferate în curele de ape minerale sau pentru tratamentele prin băi.

Dintre toate organismele vii, cea mai mare concentrație de radium a fost găsită la nevertebratele marine (la plancton $2 \cdot 10^{-11} \%$).

Fiind prezent practic în toate componentele mediului, radiul ajunge și în organismul uman. El are o radiotoxicitate ridicată, pentru că atât el cât și descendenții lui sunt α, β, γ -radioactivi.

Conținutul de radium din corpul omenesc este comparabil cu conținutul de radium din sursa de apă din care a băut omul vreme îndelungată.

În organismul uman, radiul se acumulează preferențial în țesutul osos ($\sim 3,6 \cdot 10^{-4}$ Bq/g) și ficat ($1,4 \cdot 10^{-4}$ Bq/g), etc. Radiul este un element osteotrop (se fixează în oase). Celulele țesutului osos, numite osteocite, sunt iradiate cu particule α emise de Rn și descendenții săi Po și Bi. Radiațiile β emise de ceilalți descendenți ai radonului (Tl, Pb), având parcursul mai mare prin țesutul osos decât radiațiile α emise, ajung să iradieze și măduva osoasă, deși cu o doză anuală relativ mică.

Radonul - Elementul chimic radon face parte din grupa gazelor nobile cu reactivitate chimică extrem de redusă sau chiar total fără reactivitate chimică. Toți izotopii radonului (^{222}Rn , ^{220}Rn și ^{219}Rn), numiți și emanații (Em), sunt radioactivi, având perioade de înjumătățire scurte, cea mai lungă fiind cea a ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ zile).

În natură, radonul este prezent acolo unde există elementele uraniu și thoriu, din a căror dezintegrare rezultă: în sol, în ape, în aer, în roci, etc. Fiind gaz nobil, radonul nu formează compuși chimici și nu interacționează cu nici un alt element.

Gazul radon, format prin dezintegrarea radiului (deci și a uraniului și a thoriului), are tendința de a migra chiar și la distanțe foarte mari spre aerul atmosferic. El „emană” din aerul acumulat în alveole, fisuri sau crăpături ale rocilor de munte, din aerul din sol, din apă, etc., fapt pentru care a primit numele de „emanație” (Em). Procesul de separare a radonului din roca-mamă depinde mult de temperatura mediului înconjurător, de umiditate și de structura mineralelor.

În medie, în aerul de la suprafața Pământului există un atom de radon într-un cm^3 de aer. Raportul dintre cantitatea de radon (sau Em) eliberată în spațiul exterior într-un timp t și cantitatea totală de radon ce se formează în același timp t într-o probă ce conține radium (sau uraniu și thoriu) se numește *coeficient de emanație* (CE).

Solurile au CE cuprinși între 1 și 99 %, în funcție de factorii meteorologici și geochimici. În rocile de munte CE variază în limite mai restrânse: între 15 și 30 % pentru rocile magmatice și între 10 și 25 % pentru rocile sedimentare.

Migrarea radonului are loc în funcție de condițiile geochimice, fie sub formă de gaz, fie împreună cu apa. Solubilitatea radonului în apă este mai mare la temperaturi mai joase ale apei. La ora actuală, este stabilit că sursa radioactivă principală care dă radioactivitatea naturală a straturilor joase ale atmosferei o constituie radonul. Astfel, contribuția sa și a descendenților săi la radioactivitatea atmosferică este, în medie, de aproximativ $4 \div 11 \cdot 10^{-1}$ Bq / l. Există însă situații în care radonul se acumulează în aer în concentrații mult mai mari decât cele normale, datorită lipsei de ventilație (circulație) a aerului în locul respectiv sau a unui CE mai mare. Astfel, pe vârf de munte, aerul este mai pur din punct de vedere al conținutului de radon decât aerul din vale, care e mai slab circulat decât cel de pe vârf.

În locuințele cu pereți din beton, radonul este emanat continuu din pereți și se acumulează în aerul din încăperi în concentrații mai mari decât în aerul din afara locuinței, pentru că betonul și cimentul conțin în concentrații mai mari sau mai mici uraniu și thoriu. Se impune o foarte bună aerisire a încăperilor pentru a evita creșterea peste normal a radioactivității aerului. Apa de băut, apa de la baie, gazul metan, emană de asemenea radon și se impune o foarte bună aerisire după folosirea dușului la baie (apa pulverizată are CE mult mai mari decât apa dintr-un vas) sau a gazului metan (pentru gătit și încălzit).

În orice tip de mină (nu neapărat de uraniu), dacă nu există ventilație sau dacă e prost ventilată, au loc acumulări de radon cu mult peste normal. În plus, rocile sfărâmate au un CE mult mai mare decât roca masivă, deoarece crește suprafața de emanație. Acești factori fac ca radioactivitatea aerului din mină să ajungă la valori $\sim 10^3 \div 10^4$ Bq / l care sunt cu $5 \div 6$ ordine de mărime mai mari decât valoarea normală.

Radiotoxicitatea radonului este foarte mare, iar organul critic este plămânul. Inhalat în plămâni, radonul și descendenții săi (Po și Bi) emit particule α și γ , iar ceilalți descendenți (Tl și Pb) emit radiații β și γ cu acțiune distructivă asupra țesuturilor vii. Așa se explică frecvența relativ mare a cancerului pulmonar la mineri, față de restul populației.

Produșii de dezintegrare ai radonului sunt metale grele radioactive (Po, Bi, Tl, Pb, cu perioade de înjumătățire mici. Prin dezintegrarea radonului în aerul din încăperi, produșii săi de dezintegrare se fixează pe aerosoli și se depun pe mobile, pe podea, pe pereți și pe orice alt obiect din încăpere.

Astfel, în absența unei ventilații, omul este supus și unei iradiere externe (α, β, γ) datorită radonului și descendenților săi cu care se va afla în echilibru radioactiv

La dozele interne absorbite de plămâni se adaugă dozele interne absorbite și de alte țesuturi, produșii de dezintegrare ai Rn și Tn reținuți în plămâni fiind antrenati de sânge în întreg organismul. Se știe că aproximativ 45 % din radonul din organism este „spălat” din organele interne de către circuitul sanguin și eliminat din organism odată cu aerul expirat.

6.5. IRN REZULTAȚI DIN FISIUNEA SPONTANĂ A ^{235}U , ^{238}U ȘI ^{232}Th

Fenomenul de fisiune nucleară spontană este întâlnit în cazul unor nuclee grele, printre care și izotopii ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th , care au o concentrație relativ mare în scoarța terestră și perioada de înjumătățire comparabilă cu vârsta geologică a Pământului.

Fisiunea nucleară este un proces concurent cu dezintegrarea α și se realizează cu o probabilitate mult mai mică decât aceasta (de exemplu, la uraniu: $P_{sf} = 5,5 \cdot 10^{-6}$ %) sau, echivalent, cu o perioadă de înjumătățire parțială de fisiune spontană foarte lungă (pentru ^{238}U , perioada de înjumătățire este $T_{sf} = 8,2 \cdot 10^{15}$ ani).

Produșii de fisiune sunt nuclee de masă medie, cu $A \sim 100$, neutronoexcedentare, care emit neutroni și se dezintegrează β și γ cu perioade de înjumătățire foarte mici, în comparație cu perioada de înjumătățire a părintelui.

În figura 6.2 este reprezentat spectrul după numărul de masă A al produșilor de fisiune, spectru care variază foarte puțin de la un nucleu- părinte la altul.

De remarcat este faptul că randamentul mai mare de producere îl au nucleele din zonele cu $A = 93$ și $A = 140$.

Dintre izotopii produși prin fisiune, cei mai importanți pentru impactul asupra mediului și omului sunt cei care:

- ☐ sunt produși cu randament mare;
- ☐ au perioada de înjumătățire cea mai mare;
- ☐ au proprietatea de a se acumula în anumite organe, fie datorită rolului biologic pe care îl are elementul chimic respectiv, fie datorită „izomorfismului” său cu un element chimic cu rol biologic în dezvoltarea organismului.

Dintre aceștia, cel mai important izotop natural de fisiune este ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,17$ ani) care este identificat ca atare în mediu și în organismul uman, dar în concentrații extrem de mici, contribuind la fondul natural de radiații.

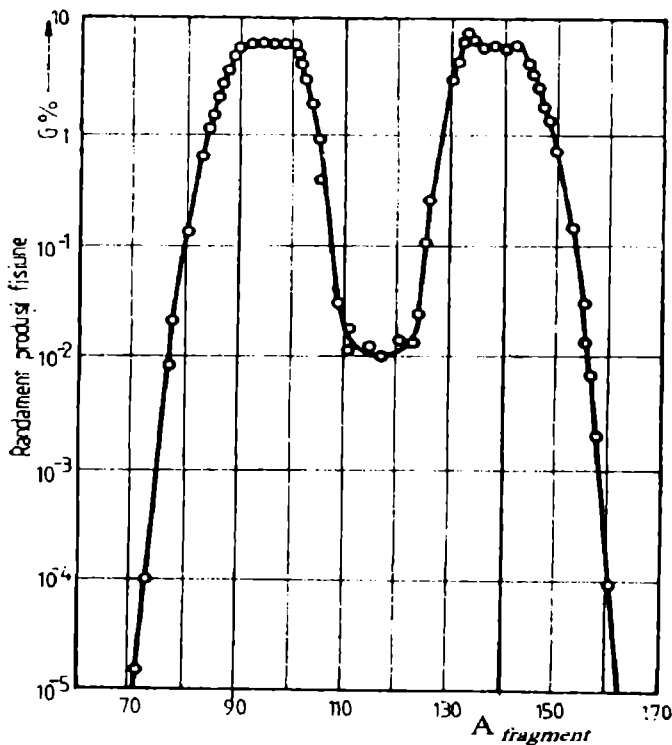


Figura 6.2: Spectrul produșilor de fisiune după numărul de masă

Este important de remarcat faptul că prin fisiunea nucleară indusă cu neutroni termici a acestor nuclee de ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th ca și a altora, care servesc drept combustibil nuclear, spectrul produșilor de fisiune este aproape identic. Datorită utilizării fisiunii induse pentru obținerea energiei electrice cantitățile mari de izotopi radioactivi produși prin fisiune nucleară indusă pun probleme speciale privind impactul acestora asupra radioactivității biosferei și ele vor fi analizate într-un capitol separat.

CAPITOLUL 7

ROCILE STÂNCOASE - SURSA PRIMARĂ A IRN DE ORIGINE TERESTRĂ

7.1. RADIOACTIVITATEA ROCILOR VULCANICE

Rocile vulcanice, indiferent de vârsta lor, conțin practic toți izotopii radioactivi naturali cunoscuți, cu excepția celor de origine cosmogenă. Dar, conținutul acestor izotopi variază de la o rocă la alta, în funcție de proprietățile ei fizico-chimice. Din aceleași considerente, diferă și activitățile α, β, γ ale rocilor, în funcție de tipul rocii.

S-a observat o creștere aproape proporțională a conținutului de ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th și ^{226}Ra cu conținutul de SiO_2 din rocă. În funcție de acest conținut, rocile vulcanice au fost clasificate în:

- ☐ roci acide (cu cel mai mare conținut de SiO_2);
- ☐ roci cu aciditate medie;
- ☐ roci bazice (sau alcaline);
- ☐ roci ultrabazice.

În aceeași ordine descresce și conținutul de elemente radioactive al acestor roci. Rocile granitice au un conținut mai mare de SiO_2 decât rocile bazice și, în consecință, radioactivitatea granitelor este mai mare decât a bazalturilor.

Concentrația de izotopi radioactivi naturali în același tip de rocă diferă de la o zonă geografică la alta, dar se păstrează dependența conținutului acestor izotopi în funcție de conținutul de siliciu în fiecare zonă geografică.

Izotopii radioactivi sunt distribuiți, de regulă, neomogen în rocile vulcanice. De aceea, fiecare probă măsurată poate avea o anumită concentrație, în funcție de locul din care a fost colectată. Pentru estimarea concentrației medii de izotopi radioactivi într-o rocă, se măsoară radioactivitatea unui număr mare de probe colectate din diferite puncte ale rocii.

Radioactivitatea β a rocilor vulcanice este generată, în esență, de izotopii radioactivi naturali ^{40}K , ^{87}Rb și unele pământuri rare.

Concentrația ^{40}K este practic proporțională cu cea de SiO_2 , deci, este mai mare în rocile acide (granitice) pentru care s-a estimat o valoare medie de aproximativ 3,5 % și o activitate specifică medie $\Lambda, (^{40}\text{K}) = 10^3 \text{ Bq /kg}$. Pentru rocile bazaltice, concentrația medie de ^{40}K este de aproximativ 1,2% și activitatea specifică este $\Lambda, (^{40}\text{K}) = 3,5 \cdot 10^2 \text{ Bq /kg}$. Pentru rocile vulcanice, ^{40}K este sursa principală de radioactivitate.

Deși rubidiul (^{87}Rb) este destul de răspândit în natură, el nu formează minerale proprii dar, în schimb, este capabil să înlocuiască potasiul în mineralele pe care le formează. Așa se explică faptul că, în natură, rubidiul este întâlnit în mineralele bogate în potasiu, în raportul $m_{\text{Rb}} / m_{\text{K}} = 1 / 80$. Astfel, la radioactivitatea β a mineralelor generată de ^{40}K , se adaugă o contribuție mai mică, datorată ^{87}Rb . Dar, există și cazuri de minerale cu conținut mai bogat în rubidiu, însă acestea sunt mai rare.

Dintre pământurile rare, izotopii ^{138}La , ^{150}Nd și ^{176}Lu contribuie la radioactivitatea β a rocilor vulcanice în care aceste elemente sunt conținute. Această contribuție este cu $2 \div 4$ ordine de mărime mai mică decât radioactivitatea dată de ^{40}K . Ceilalți izotopi radioactivi care se dezintegrează β , ca și produșii dezintegrărilor în lanț ale uraniului și thoriului β - radioactivi, dau contribuții mai mici la radioactivitatea β a rocilor vulcanice.

Radioactivitatea α a rocilor vulcanice este, în cea mai mare parte, generată de izotopii radioactivi ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U și de descendenții lor α - emițători, și într-o mai mică măsură de cei ai pământurilor rare, care emit radiații α : ^{142}Ce , ^{144}Nd , ^{147}Sm . În familiile ^{235}U și ^{238}U sunt câte nouă descendenți α - emițători, iar în familia ^{232}Th doar opt astfel de descendenți. Cea mai mare concentrație de emițători α se află în rocile acide, unde concentrația de uraniu este relativ mare, dar cu variații de la o rocă la alta.

Unele roci granitice conțin până la $3 \cdot 10^{-3} \% \text{ U}$ și au o activitate specifică $\Lambda_{\alpha}(\text{U}) \approx 7,4 \cdot 10^2 \text{ Bq / kg}$, relativ mare față de alte roci granitice care sunt foarte slab radioactive.

Se remarcă o mare neomogenitate în distribuirea acestor izotopi radioactivi α - emițători pe glob, dar și în limitele unei formațiuni geologice date. Astfel, pentru evaluarea unor concentrații medii, pe diferite tipuri de roci (acide, bazice, etc.) se fac măsurători de concentrații pe foarte multe probe, luate din diverse locuri. În acest mod s-au evaluat concentrațiile medii pentru uraniu, thoriu și radium în funcție de tipul de rocă, situație prezentată în tabelul 7.1.

Concentrațiile celorlalți descendenți sunt extrem de mici, la fel ca și cele ale izotopilor radioactivi din categoria pământurilor rare.

Emisiile de radiații α sau β de către izotopii radioactivi naturali sunt urmate, de regulă, de emisie de radiații γ .

Tabelul 7.1: Concentrațiile medii pentru uraniu, thoriu și radium în diferite tipuri de roci (dupa datele din ref.[4])

Roca	Th $10^{-3} \%$	Λ_{α} Bq / Kg	U $10^{-4} \%$	Λ_{α} Bq / Kg	Ra $10^{-10} \%$	Λ_{α} Bq / Kg
Acide (granite)	2	82	10	120	2,9	100
Acide medii	1	41	7,5	90	2,58	~90
Bazice	0,6	25	4,4	53	1	~35

7.2. MIGRAREA IZOTOPILOR RADIOACTIVI NATURALI DIN ROCILE VULCANICE SPRE ALTE MEDII

Numeroasele studii geochimice efectuate au condus la concluzia că geosfera granitică a Pământului conține cea mai mare cantitate de izotopi radioactivi naturali. În plus, s-a stabilit că radioactivitatea scade cu adâncimea, cele mai mari concentrații de izotopi radioactivi naturali aflându-se în stratul granitic superficial până la adâncimea de circa 15 km. De asemenea, s-a ajuns la concluzia că, cel mai slab radioactiv este nucleul central al Pământului (de aproximativ 30 de ori mai slab radioactiv decât stratul granitic), iar radioactivitatea stratului bazaltic este cam de 3 ori mai slabă decât cea a stratului granitic (este vorba de activitatea specifică medie). De aici rezultă că, în timpul transformărilor evolutive ale suprafeței planetei care au dus la formarea troposferei, hidrosferei, pedosferei și biosferei, rocile granitice au fost furnizorul de izotopi radioactivi pentru toate geosferele planetei. Astfel, și în prezent, radioactivitatea diferitelor verigi (componente) ale biosferei, se află corelată genetic cu rocile granitice corespunzătoare zonei geochimice respective. Această dependență este determinată de faptul că izotopii radioactivi naturali din structurile morfologice primare se desprind treptat din formațiunile native din scoarța terestră, ca urmare a unor procese fizico-chimice complexe, și sunt incluse în circuitul substanțelor din biosferă.

Trecerea izotopilor radioactivi naturali din rocile muntoase spre componentele biosferei se face, în primul rând, prin intermediul apei. Apa participă activ la transferul izotopilor radioactivi naturali din sfera materiei minerale în cea a substanței vii (figura 7.1), datorită proprietăților ei fizico-chimice care favorizează acest transfer. Apa care pătrunde în crăpăturile și în porii rocilor dizolvă și antrenează în circuitul ei și compuși radioactivi, alături de alți compuși chimici, pe care îi aduce din adâncul Pământului la suprafața lui, în mediul în care are loc biogeneza. Deasemenea, prin erodarea rocilor, fragmentele de roci, care conțin și izotopi radioactivi, sunt transportate de apă la distanțe mari de locul de origine.

Uraniu, spre deosebire de thoriu, are o solubilitate relativ bună, și de aceea continuă să migreze în stare dizolvată și după eliberarea sa din structurile granitice, participând mai activ decât thoriul la circuitul substanțelor în biosferă. Așa se explică prezența uraniului în substanța organică cu o concentrație medie de ordinul $(1 \div 9) \cdot 10^{-4} \%$ în timp ce thoriul practic nu există. Introducerea izotopilor radioactivi din roci în circuitul substanțelor prin mediu este facilitată și de agentul eolian: curenții de aer, vânturile, erodează și transportă sub formă de praf fragmente din rocile vulcanice cu izotopii radioactivi naturali conținuți în ele. Praful radioactiv poate, de asemenea, să ajungă la distanțe mari de roca-mamă și să cadă liber sau odată cu precipitațiile pe suprafața Pământului, în apă, pe vegetație, etc, și astfel să intre în circuitul substanțelor din biosferă.

Descendenții thoriului și ai uraniului se află mai împrăștiați în natură decât izotopii radioactivi cap de serie. Nu există minerale ale acestor descendenți, ei acumulându-se în masa de uraniu și thoriu care le generează, dar în concentrații foarte mici.

Izotopii radioactivi ai gazului nobil radon (Rn), descendenți ai uraniului și ai thoriului, migrează din rocă prin pori și crăpături, ajungând în aerul de la suprafața rocilor. Radonul este un gaz mai greu decât aerul atmosferic și, în general, se păstrează în straturile atmosferice cele mai joase, dar poate migra la distanțe relativ mari de locul de origine (înainte de a se dezintegra) și intra chiar în circuitul biologic al substanțelor chimice.

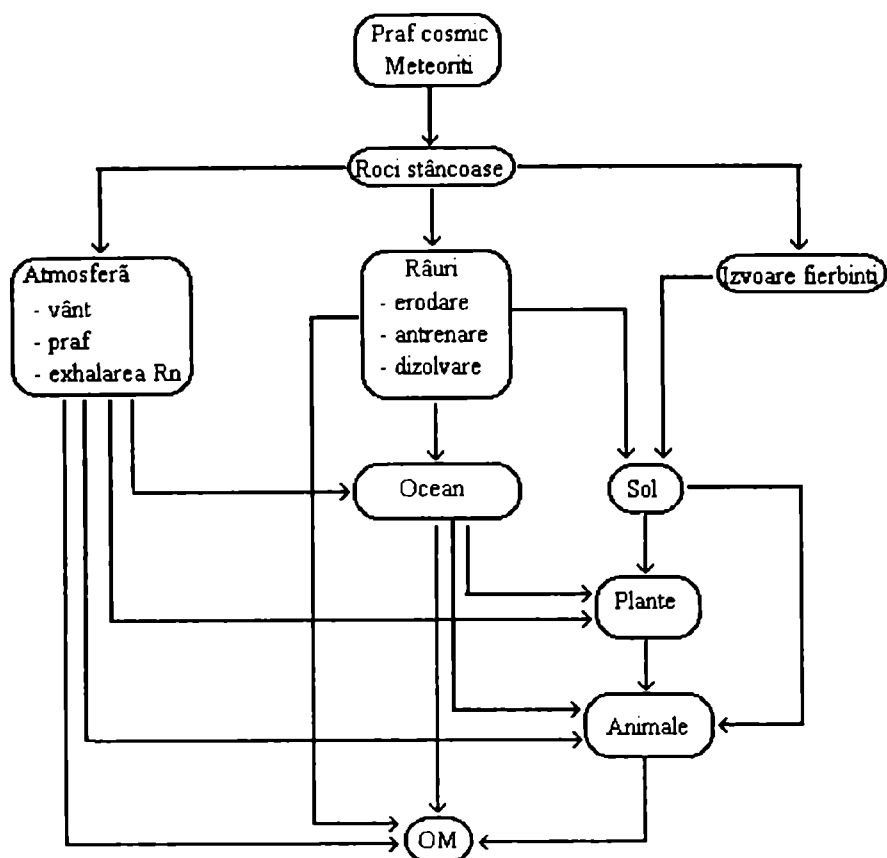


Figura 7.1: Schema circuitului izotopilor radioactivi naturali din rocile stâncoase; căile de transfer ale izotopilor radioactivi din rocile stâncoase în alte componente ale mediului până la om.

7.3. RADIOACTIVITATEA ROCILOR SEDIMENTARE

După calitatea materialelor din care s-au format, rocile sedimentare se împart în trei categorii:

- ☐ **Roci de fragmentare** - sunt formațiuni geologice alcătuite din fragmente de roci magmatice (vulcanice); în această categorie menționăm: pietrișurile, nisipurile, argilele, etc.;
- ☐ **Roci chimice** - sunt straturi formate prin depunerea compușilor chimici dizolvați în apă, cum ar fi: sarea gemă, sedimentele de gips, etc.;
- ☐ **Roci organice** - sunt straturi formate ca urmare a activității biologice a unor organisme foarte vechi, în această categorie intrând: cărbunele fosil, calcarele, șisturile de siliciu, etc.

Cea mai mare cantitate din substanța de bază este rezultată din „prelucrarea” rocilor vulcanice de către agenții geologici de suprafață. Rezultă că și radioactivitatea rocilor sedimentare este corelată cu procesele care au dus la formarea lor: eroziune, transport, depunere.

Izotopii radioactivi au o distribuție neomogenă în rocile sedimentare, cu variații mari de concentrație dar, în general, au o radioactivitate mai slabă decât rocile vulcanice (uneori cu $1 \div 2$ ordine de mărime). Cele mai slab radioactive sunt sedimentele pur organice și cele chimice (sarea gemă, gipsul, calcarele, nisipurile albe din cuarț pur, etc.). Sedimentele cele mai radioactive sunt șisturile argiloase și argilele.

Principalii izotopi radioactivi naturali care contribuie la radioactivitatea rocilor sedimentare sunt: ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra și ^{40}K . În tabelul 7.2 sunt date evaluările orientative ale activității specifice medii ale unor roci sedimentare. Se observă că ^{40}K dă cea mai mare contribuție la radioactivitatea acestor roci.

Tabelul 7.2: Activitatea specifică medie a rocilor sedimentare
(în Bq /kg) (ref [4]):

Roca	^{226}Ra	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Calcare	18,5	18,5	4,81	88,8
Gresii	55,5	48,1	22,2	325,6
Argile și șisturi	48,1	51,8	48,1	777

7.4. IZOTOPI RADIOACTIVI NATURALI DE FISIUNE ȘI DE ACTIVARE ÎN ROCILE STÂNCOASE

Fisiunea spontană a ^{238}U ($T_{1/2}^{\text{SF}} = 8 \cdot 10^{15}$ ani); ^{235}U ($T_{1/2}^{\text{SF}} = 1,87 \cdot 10^{17}$ ani) și ^{232}Th ($T_{1/2}^{\text{SF}} = 1,35 \cdot 10^{18}$ ani) conduce la formarea unei serii de izotopi radioactivi de masă medie, cu perioada de înjumătățire foarte mică în comparație cu vârsta geologică. Contribuția acestor izotopi radioactivi naturali la radioactivitatea rocilor care conțin uraniu este nesemnificativă. Există, totuși, doi izotopi radioactivi rezultați din fisiune, cu timp de viață semnificativ mai lung, care se produc cu randamentele de 5 % (^{90}Sr cu $T_{1/2}^{\text{SF}} = 27,7$ ani) și, respectiv, 6 % ^{137}Cs ($T_{1/2}^{\text{SF}} = 30$ ani) și care există acumulați în rocile respective, evident în concentrații foarte mici. De asemenea, și în rocile de munte au fost „emanate” gazele nobile Xe și Kr care există în atmosferă și care sunt rezultate din fisiunea nucleară spontană a ^{235}U , ^{238}U și a ^{232}Th . O contribuție suplimentară la concentrațiile de ^{90}Sr și ^{137}Cs (ca și ale Xe și Kr) se obține prin fisiunea indusă a ^{235}U produsă de neutronii emiși la fisiunea spontană a ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th sau de neutronii produși în atmosferă sub acțiunea razelor cosmice.

În zăcămintele de uraniu au fost identificați și izotopii radioactivi transuranieni ^{237}Np ($T_{1/2} = 2,2 \cdot 10^6$ ani) și ^{239}Pu ($T_{1/2} = 2,4 \cdot 10^4$ ani), ambii α - radioactivi, în concentrații extrem de mici, nesemnificative, și care nu prezintă importanță în analiza problemelor biologice. Ei se formează din ^{238}U prin captura de neutroni.

CAPITOLUL 8

RADIOACTIVITATEA ȘI CIRCUITUL IZOTOPILOR RADIOACTIVI ÎN SOL

8.1. SURSELE DE IZOTOPI RADIOACTIVI DIN SOL

Principală sursă a izotopilor radioactivi din orice tip de sol o constituie rocile din a căror eroziune a rezultat componenta minerală a acestuia. În consecință, în sol vor fi preponderenți acei izotopi radioactivi care au concentrație mai mare în roca-mamă dar, practic întotdeauna, concentrația acestora în sol este mai mică decât în roca de origine.

Solurile provenite din roci magmatice acide au un conținut ridicat de K, U, Th și Ra, în timp ce solurile provenite din roci bazice sau ultrabazice au un conținut mai mic de izotopi radioactivi. În plus, în majoritatea solurilor, ^{40}K este principală sursă naturală de radioactivitate. Excepție fac solurile din vecinătatea unor zăcăminte minerale cu conținut mare în U și Th: componenta minerală a acestora este mult îmbogățită în aceste elemente chimice radioactive față de medie.

Există însă și surse de izotopi radioactivi cu contribuții mai modeste la radioactivitatea solului. Astfel, cantități mici de elemente radioactive cad pe sol din atmosferă odată cu resturile de meteoriți și praful cosmic, dar aportul lor la radioactivitatea solului este nesemnificativ.

De asemenea, o parte din radioactivitatea solului provine din componenta sa organică. Vegetația și organismele animale conțin în structura lor izotopi radioactivi care trec în sol în urma procesului de descompunere a acestora. Apele care udă solul conțin în stare dizolvată substanțe minerale care au în structura lor izotopi radioactivi, favorizând astfel schimbul între sol și plante a acestor izotopi.

O contribuție importantă la radioactivitatea solurilor o au descendenții uraniului, ai thoriului, dar, mai ales, cei ai radiului. Aerul din sol conține emanațiile radioactive (izotopii radioactivi ai radonului) și produșii lor de dezintegrare (Bi, Po, Tl, Pb). În porii și în capilarele granulelor de sol, aerul are o concentrație mai mare de radon (Rn). Prin preluarea mecanică a solului (arat, grăpat, etc.) radonul ajunge în aerul atmosferic de la suprafața solului și intră în circuitul substanțelor din biosferă.

8.2. ATENUAREA RADIOACTIVITĂȚII SOLULUI

Atenuarea radioactivității solului este produsă pe mai multe căi:

- ☐ dezintegrarea izotopilor radioactivi;
- ☐ asimilarea de către plante a izotopilor radioactivi;
- ☐ spălarea solurilor de către ape (râuri, ploi, inundatii);
- ☐ antrenarea emanațiilor datorită vânturilor;
- ☐ exhalarea (eliberarea în atmosferă).

Solurile argiloase sunt mai rezistente la acțiunea unora dintre acești factori și, de aceea, au un conținut mai mare de elemente radioactive. În plus, solurile argiloase au proprietatea de a adsorbi din soluții apoase și din suspensiile coloidale (dimensiunea substanțelor minerale este mai mică de 0,02 mm) K, U, Th și alte elemente radioactive care se regăsesc apoi fixate la suprafața particulelor (granulelor) acestor soluri.

8.3. CONCENTRAȚIA UNUI IZOTOP RADIOACTIV ÎNTR-O PROBĂ DE SOL

Concentrația unui izotop radioactiv într-o probă de sol depinde de o serie de factori, cum sunt:

- ☐ tipul de sol (de exemplu, solurile argiloase conțin mai mult radiu decât solurile nisipoase);
- ☐ zona geografică (tipul de rocă, vegetație, ape, etc.);
- ☐ condițiile climaterice (precipitații, vânt, temperatură, etc.);
- ☐ adâncimea de la care a fost prelevată proba (datorită migrării pe verticală a izotopilor radioactivi);
- ☐ tipul elementului radioactiv;
- ☐ acțiunea omului în cadrul lucrărilor agricole.

Astfel, pentru orice tip de sol, conținutul de uraniu este mai mare în regiunile aflate mai aproape de roca-mamă decât în cele aflate la o distanță mai mare de ea. Straturile de la suprafața solului sunt mai sărace în uraniu decât straturile mai profunde, fapt corelat cu solubilitatea compușilor complecși ai uraniului. Uraniul din straturile superficiale este continuu spălat și antrenat de către ape spre straturile mai profunde, unde crește concentrația lui. Fenomenul de spălare este mai accentuat în solurile de pădure (podzolice), unde concentrația de uraniu la suprafață este mult mai mică decât concentrația medie de uraniu în scoarța Pământului. Valoarea medie a conținutului de uraniu în soluri este de aproximativ 10^{-4} %, față de $3 \cdot 10^{-4}$ % în scoarța terestră.

Mineralele în a căror compoziție intră thoriul au o solubilitate foarte redusă. Spre deosebire de uraniu, thoriul are tendința de a se acumula în straturile superficiale ale solurilor. Compușii de thoriu sunt aduși și depuși la suprafața solului de către ape, vânt, dar nu sunt antrenați în adâncimea acestuia prin spălarea solului. În mod similar se comportă și radiul.

Concentrațiile medii de thoriu și radiu în soluri sunt, de asemenea, mai mici decât în scoarța terestră, de $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ % pentru Th și $\sim 8 \cdot 10^{-11}$ % pentru Ra, față de $8 \cdot 10^{-4}$ % Th în scoarța terestră. Variațiile concentrațiilor de U, Th și Ra, în funcție de tipul de sol sunt sub un ordin de mărime. La aceste variații contribuie, în bună măsură, și ponderea pe care o are în structura solurilor componenta coloidală și fenomenul de adsorbție a izotopilor radioactivi pe componenta de tip argilă în sol.

8.4. RADIOACTIVITATEA α ȘI β A SOLULUI

Uraniul, thoriul și radiul împreună cu descendenții lor α - activi dau cea mai mare parte a radioactivității α a solurilor. Activitatea specifică a probelor de sol va purta amprenta factorilor care influențează concentrațiile acestor izotopi radioactivi în sol, și este de ordinul 10 Bq /kg. Contribuția izotopilor α - radioactivi ai pământurilor rare ^{142}Ce , ^{144}Nd , ^{147}Sm la

activitatea specifică a solului ($10^{-1} + 10^{-4}$ Bq /kg) este cu 3 + 5 ordine de mărime mai mică decât a uraniului, thoriului și radiului.

Radioactivitatea β a solurilor este datorată în esență ^{40}K , care dă o contribuție la activitatea specifică $\Lambda_{\beta} (^{40}\text{K}) \approx 10^3$ Bq /kg, și de descendenții β radioactivi ai uraniului și ai thoriului și în mai mică măsură de ^{87}Rb (cu o contribuție la activitatea specifică de $\Lambda_{\beta} (^{87}\text{Rb}) \approx 10$ Bq/kg.)

S-a observat că solurile cu o granulație mai mică au activitatea specifică β mai mare decât cele cu granulație mai mare, fapt corelat cu proprietățile de schimb și de sorbție mai puternice ale solurilor cu granulație mai mică (în argile, concentrația este mai mare decât în solurile nisipoase).

O altă observație este legată de faptul că, indiferent de tipul de sol, stratul superficial (2 + 5 cm), mai bogat în vegetație și microfloră, este de aproximativ trei ori mai bogat în izotopi radioactivi β - emițători (^{40}K), decât straturile mai adânci.

Contribuția estimată prin calcule a izotopilor radioactivi ^{90}Sr și ^{137}Cs , rezultați din fisiunea naturală a uraniului și thoriului, la radioactivitatea β a solurilor este nesemnificativă ($\approx 10^{-1}$ Bq /kg). Asemenea estimări permit evaluarea gradului de contaminare radioactivă (estimată în Bq /m²) a straturilor solului, contaminare datorată izotopilor radioactivi de Cs și Sr ce cad pe sol împreună cu alți izotopi radioactivi rezultați din explozii nucleare sau accidente nucleare.

Cultivarea pământului de către om implică o serie de activități care pot influența radioactivitatea solului cultivat:

- ☐ aratul și grăpatul;
- ☐ fertilizarea solului prin aportul de îngrășăminte naturale și artificiale;
- ☐ irigațiile;
- ☐ semănatul și recoltatul.

Aceste activități influențează structura și morfologia solului, umiditatea lui, redistribuirea izotopilor radioactivi în profilul solului, circuitul acestor izotopi în biosferă, aerisirea solului. Prin arătură, straturile de sol de la suprafață sunt interschimbate cu cele din profunzime și are loc o rearanjare a concentrațiilor izotopilor radioactivi în profilul solului. Grăpatul mărunțește granulele de sol, mărește capacitatea lui de schimb și de sorbție a izotopilor radioactivi. Plantele cultivate asimilează din sol potasiul (care le este necesar pentru creștere și maturizare), sărăcind solul în acest element radioactiv. Prin irigații, umiditatea solului crește și este favorizată asimilarea sărurilor solubile de potasiu (și ale altor elemente radioactive) de către plante și sărăcirea solului în izotopii radioactivi corespunzători. Prin administrarea de îngrășăminte potasice în zonele în care se practică agricultura intensivă se reface o parte din rezerva de potasiu consumat de către plante. Prin adăugarea excesivă a sărurilor de potasiu în sol (mai mult decât au plantele nevoie) are loc o creștere sistematică a radioactivității solului.

8.5. EMANAȚIILE RADIOACTIVE DIN SOL

Emanațiile radioactive din sol (radon, actinon, thoron) ocupă un loc aparte în „inventarul” radioactiv al solului. Radonul, actinonul și thoronul rezultă din dezintegrarea în lanț a ^{238}U , ^{235}U și respectiv ^{232}Th , care se află în diferite concentrații, practic în toate tipurile de sol. Toți acești izotopi radioactivi se dezintegrează și au perioadele de înjumătățire: $T_{1/2} = 3,9$ s (An), $T_{1/2} = 51,5$ s (Tn), $T_{1/2} = 3,8$ zile (Rn). Odată apărute, aceste emanații încep să difuzeze prin porii și capilarele solului spre aerul atmosferic. Astfel, o parte din emanații sunt conținute în

sol și contribuie la radioactivitatea lui: cantitatea de emanații din sol este continuu „alimentată” prin dezintegrarea izotopilor radioactivi ai uraniului și thorului din sol, și totodată scade prin fenomenul de migrare a emanațiilor din sol în aerul atmosferic și prin dezintegrare radioactivă.

Rezerva de actinon din sol scade rapid prin dezintegrare radioactivă, datorită perioadei de înjumătățire foarte mici, și numai cantități mici din aceste emanații ajung în aerul atmosferic. Emanațiile de tip radon (^{222}Rn) cu $T_{1/2}$ de ordinul zilelor au cea mai mare șansă de a ajunge în aerul atmosferic (înainte de a se dezintegra) și de a intra în circuitul izotopilor radioactivi în mediu.

Există o serie de factori care influențează puterea de emanare a acestor izotopi radioactivi ai radonului din sol, astfel că și concentrația din sol va depinde de acești factori, care sunt enumerați mai jos:

☐ tipul de sol și granulația;

☐ factorii meteorologici:

■ presiunea atmosferică;

■ temperatura solului și a aerului;

■ umiditatea solului;

☐ starea stratului de la suprafața solului (starea de îngheț sau de dezgheț a solului, acoperirea lui cu zăpadă, etc.);

☐ precipitațiile;

☐ anotimpurile;

☐ lunile, zilele, orele, etc.;

☐ prelucrarea solului.

Cele mai mari concentrații de radon s-au observat în solurile argiloase, iar cele mai mici în calcare și nisipuri pure. După ploaie, concentrația de radon din sol crește deoarece sunt astupate capilarele solului și exhalția este împiedicată. De asemenea, când stratul de la suprafața solului este înghețat sau acoperit cu zăpadă, accesul emanațiilor din sol în exterior este mult îngreunat, iar concentrația de radon și toron în sol este mai mare

Temperaturile ridicate (în sol și aer) favorizează exhalarea radonului din sol, în timp ce presiunea atmosferică ridicată o împiedică. Evident, prin prelucrarea mecanică a solului are loc și o „aerisire” a lui, care ușurează migrarea radonului și sărăcirea solului în acest element. Astfel, în aerul de la suprafața solului se acumulează izotopi radioactivi ai radonului care creează un câmp de radiații α la acest nivel, mai intens decât în straturile atmosferice superioare.

În schema 8.1. sunt figurați factorii care influențează direct sau indirect radioactivitatea și circuitul izotopilor radioactivi din sol.

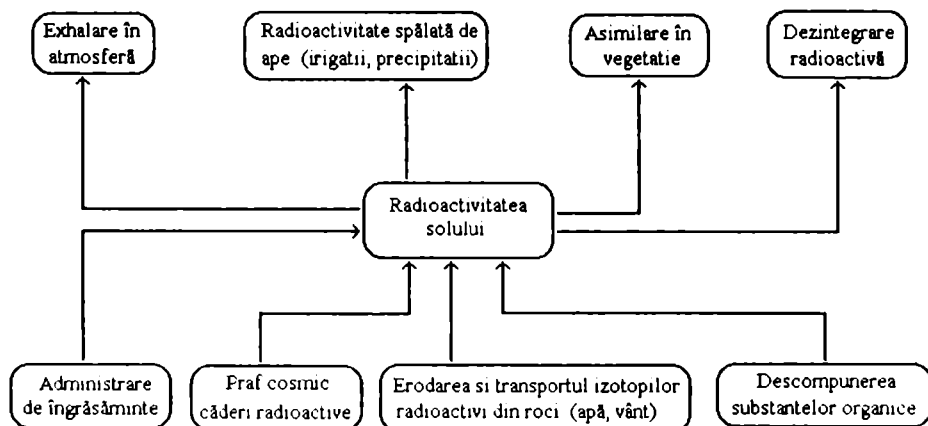


Figura 8.1: Factorii care influențează radioactivitatea naturală a solurilor

CAPITOLUL 9

RADIOACTIVITATEA NATURALĂ ȘI CIRCUITUL IRN ÎN ATMOSFERĂ

9.1. ORIGINEA IRN DIN ATMOSFERĂ

Rolul extrem de important al atmosferei terestre în existența vieții pe Pământ impune cu necesitate păstrarea ei în parametri naturali. Aceasta implică, pe de o parte, cunoașterea cât mai exactă a acestor parametri și a dinamicii lor naturale, iar pe de altă parte, supravegherea permanentă a calității mediului și a acțiunii ferme împotriva surselor de poluare.

Un parametru important care caracterizează calitatea aerului pe care îl respirăm este radioactivitatea atmosferei, generată de prezența izotopilor radioactivi, în toate componentele acesteia. O parte dintre acești izotopi radioactivi ajunge în mod natural în atmosferă, iar altă parte ajunge ca urmare a activității umane.

Evaluarea radioactivității atmosferice se face prin măsurarea radioactivității α , β sau γ separat pentru fiecare componentă a acesteia.

Se știe că în atmosferă, în afară de componenta gazoasă, există vapori și picături de apă (apă suspendată), cristale de gheață, praf (aerosoli).

În acest scop se măsoară activitatea specifică a apei de ploaie, a grindinei și a zăpezii colectate și apoi topite în diferite puncte de pe glob. Precipitațiile, apa de ploaie, grindina și zăpada antrenează în cădere și o parte din particulele de praf, „spălând” astfel atmosfera. Apa de ploaie colectată, ca și apa obținută prin topirea zăpezii, se separă de aceste particule de praf fie prin filtrare, fie prin sedimentare, fie prin evaporare, astfel încât să se poată măsura separat radioactivitatea apei „pure” și a suspensiilor din ea. Pentru măsurarea activității specifice a componentei gazoase se aspiră aerul cu ajutorul unor pompe cu debit cunoscut și este trecut printr-un filtru care reține particule solide.

În continuare, se măsoară separat radioactivitatea substanței reținute pe filtru, după filtrarea unui volum de gaz bine determinat (volumul = debit \cdot timp).

Măsurarea radioactivității componentei gazoase se face fie în regim de curgere cu debit constant cunoscut, fie după colectarea în capsule a unui volum dat de gaz. Pentru fiecare componentă activitatea specifică este dată în Bq /l.

Izotopii identificați în atmosferă sunt, evident, cei cosmogenici (produși chiar în atmosferă sub acțiunea razelor cosmice), principalii izotopi radioactivi de origine terestră (ajunși în atmosferă pe diferite căi) și izotopi radioactivi produși pe cale artificială.

În funcție de condițiile în care ajung în atmosferă, izotopii radioactivi (IR) pot fi grupați astfel:

- ☐ IR de origine cosmogenă, creați direct în atmosferă prin interacțiunea radiațiilor cosmice cu atmosfera;
- ☐ IR care ajung în atmosferă sub formă de emanații;
- ☐ IR din praful terestru ridicat de vânt în atmosferă;
- ☐ IR din stropii de apă marină ridicați în aer de vânt;
- ☐ IR din praful cosmic ce „cade” spre Pământ străbătând atmosfera terestră;
- ☐ IR naturali ce ajung în atmosferă datorită activităților gospodărești și industriale ale oamenilor;
- ☐ IR artificiali ce ajung în atmosferă în urma exploziilor nucleare sau de la centralele nucleare electrice (accidentele nucleare).

Impactul omului asupra radioactivității atmosferei are loc în mod esențial și direct pe ultimele două căi, și într-o măsură mai mică și indirect (prin prelucrarea pământului) pe a doua și a treia cale.

În capitolul de față ne vom referi numai la radioactivitatea naturală a atmosferei, a dinamicii ei, care trebuie bine cunoscută în diferitele zone de pe glob, pentru ca apoi să se facă o evaluare corectă a oricărei contaminări radioactive în aceste zone.

9.2. RADIONUCLIZII COSMOGENICI

Principalii izotopi radioactivi de origine cosmogenă sunt cei care au un randament de producere mai mare și cei care, datorită rolului lor biochimic sunt importanți în dezvoltarea organismelor vii.

În capitolul 6 au fost prezentați principalii izotopi radioactivi de origine cosmogenă și proprietățile lor. Reamintim care sunt aceștia: $^{14}_6\text{C}$ și ^3_1H cu cel mai mare randament de producere și care aparțin unor elemente chimice cu rol primordial pentru substanța organică, urmați de ^7_4Be , $^{10}_4\text{Be}$, $^{22}_{11}\text{Na}$, $^{32}_{15}\text{P}$, $^{35}_{15}\text{P}$, $^{35}_{16}\text{S}$, $^{39}_{17}\text{Cl}$, etc. Contribuția cea mai mare la radioactivitatea atmosferică o are izotopul radioactiv $^{14}_6\text{C}$ urmat de ^3_1H .

Randamentul de producere al ^{14}C este de $\sim 1,8$ nuclee de ^{14}C produse într-o secundă într-un kg de aer. El este produs în straturile superioare ale atmosferei, se combină cu oxigenul din atmosferă formând bioxidul de carbon (CO_2) și în această formă intră în circuitul din biosferă.

În studii de geochimie s-a estimat că la circuitul substanțelor din biosferă participă aproximativ $14 \cdot 10^{14}$ tone de carbon (pe întreg Pământul), din care numai 1,5% se află în atmosferă, restul de 98,5% fiind în celelalte componente ale biosferei. Știind abundența izotopică a ^{14}C ($1,8 \cdot 10^{-10}\%$), rezultă că, în întreaga atmosferă există aproximativ 11 tone de ^{14}C , ea fiind de fapt rezervorul de ^{14}C al planetei. Datorită circuitului carbonului în natură are loc un schimb continuu de ^{14}C între atmosferă, pe de o parte, și hidrosferă, sol și lumea organică, pe de altă parte. Plantele absorb ^{14}C din aer prin asimilație, iar omul și animalele prin hrană vegetală și apă. Astfel, ^{14}C intră în structura materiei vii, cu aceeași abundență izotopică pe care o are în atmosferă.

Schimbul de ^{14}C între atmosferă și rocile muntoase nu este la fel de activ ca cel cu solul și cu substanțele organice. De aceea, abundența izotopică a ^{14}C în rocile calcaroase este considerabil mai mică și scade cu vârsta rocii datorită dezintegrării în timp a acestui izotop. De asemenea, schimbul de ^{14}C cu apa mării este mai slab și concentrația medie de ^{14}C ($\sim 0,002\%$ sau $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/l}$) este relativ mică.

Tritiul este generat de radiația cosmică în atmosferă pe mai multe căi (vezi cap. 6), în special în reacții ale neutronilor cu azotul din atmosferă, cu un randament total ce nu depășește $0,3 \text{ atom/cm}^2\text{s}$. Acest randament depinde de fluxul de radiații cosmice și de latitudinea geomagnetică. Circuitul ^3_1H în biosferă este corelat cu circuitul apei deoarece, după formarea sa în straturile superioare ale atmosferei, se combină cu oxigenul din aer și formează apa tritiată sau apa supergrea.

Conținutul cel mai bogat în ^3_1H se află în precipitațiile atmosferice. Experimental s-a verificat că la zonele cu latitudine geografică mai mare (unde intensitatea radiației cosmice este mai mare), precipitațiile au un conținut mai mare de tritii decât cele de la latitudini mai mici.

Din conținutul total de ^3_1H din biosferă, estimat la $\sim 1,8 \text{ kg}$, în aerul atmosferic există o cantitate constantă ce nu depășește 11 grame! În apa de ploaie, concentrația medie de tritii a fost evaluată la valori de ordinul $10^{-18} \div 10^{-17}$ atomi ^3_1H la un atom de hidrogen.

Concentrația naturală foarte mică a ^3_1H , ca și energia mică a radiațiilor β emise de acesta ($E_{\beta \text{ max}} = 0,0179 \text{ MeV}$, parcurs în aer la presiune normală $\sim 2 \text{ mm}$) fac ca acest izotop radioactiv să fie semnificativ pentru radioactivitatea naturală a atmosferei în special atunci când se ia ca referință pentru evaluarea contaminării cu ^3_1H produs pe cale artificială, fie în timpul exploziilor nucleare, fie în timpul funcționării centralelor nucleare.

Izotopul radioactiv ^7_4Be se produce în atmosferă sub acțiunea protonilor rapizi în reacții de tipul $^{14}_7\text{N} (p, 2\alpha) ^7_4\text{Be}$ cu un randament de cca. $3000 \text{ atom/(cm}^2 \cdot 24 \text{ h)}$. El formează compuși chimici de tip oxid (BeO) sau hidroxid (Be(OH)_2). Moleculele de oxid și de hidroxid de beriliu difuzează în atmosferă până când se atașează la particule de aerosoli sau la picături de apă împreună cu care cad apoi pe Pământ.

Concentrația medie de ^7_4Be în aer este $\sim 12 \text{ atomi/litru}$, ceea ce înseamnă o activitate specifică de $\sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ Bq/l}$ de aer. Apa de ploaie are o activitate specifică medie dată de ^7_4Be de $\sim 0,7 \text{ Bq/l}$, în timp ce apa rezultată din topirea zăpezii are o activitate specifică ceva mai mică $0,5 \text{ Bq/l}$.

Intensitatea de producere a ^7_4Be crește cu altitudinea (în troposferă $1,3 \text{ atomi/cm}^2 \cdot \text{min}$, în stratosferă $5 \text{ atomi/cm}^2 \cdot \text{min}$) și cu latitudinea geomagnetică.

Izotopul $^{10}_4\text{Be}$ se produce în atmosferă într-un ritm de $3 \div 6 \text{ atomi/cm}^2 \cdot \text{min}$.

Ajungând la suprafața pământului, în aer sau în apă și sol, beriliul intră prin lanțurile alimentare în procesele de schimb cu organismele vegetale și animale.

În ceea ce privește prezența altor izotopi radioactivi de origine cosmogenă, s-au estimat concentrații ale acestora în aer sau în apele colectate din precipitații, obținându-se valori foarte mici (ca de exemplu: $10^5 \div 10^6$ atomi de ^{35}S la 1 litru apă, 34 atomi de ^{22}Na la 1 gram de sediment uscat din apa de ploaie, etc.).

9.3. RADIOACTIVITATEA AEROSOLILOR

Aerosolii reprezintă componenta solidă a atmosferei, aflată în stare fin dispersată în aceasta.

„Prăfuirea” atmosferei este cauzată de:

☐ vânt;

☐ erupții vulcanice;

☐ atracția gravitațională exercitată de Pământ asupra prafului și corpurilor cosmice;

☐ activitatea omului.

Vântul, prin acțiunea sa de erodare și transport eolian, ridică în atmosferă particule de roci stâncoase sau din soluri sub formă de praf. Acest praf conține acei izotopi radioactivi (K, Th, U) care existau și în materia de origine, fiind și principala sursă de aerosoli.

Intensitatea prăfuirii depinde mult de tipul de sol unde suflă vântul, fiind foarte mare în zonele de pustiuri nisipoase, de stepă, în general în zonele cu soluri neacoperite de vegetație.

Praful ridicat de vânt în atmosferă poate fi transportat la distanțe foarte mari față de punctul de formare. După compoziția sa chimică se poate identifica zona de origine a prafului din atmosferă.

Deși dimensiunile particulelor de praf din atmosferă sunt foarte variate și ajung până la ordinul milimetrului, s-a observat că cea mai mare parte a radioactivității naturale a aerosolilor revine fracțiunii de particule cu dimensiunile cuprinse în intervalul $0,01 \div 0,04 \mu\text{m}$, cu maximul în zona $0,02 \mu\text{m}$.

Concentrația de aerosoli în straturile joase ale atmosferei depinde de stratificarea temperaturii și a vânturilor în atmosfera joasă. De aceea, iarna și toamna, aerul este mai prăfuit în straturile foarte joase în raport cu cele mai înalte, în timp ce vara, când aerul cald de la sol se ridică antrenând aerosolii din straturile mai joase în cele mai înalte, stratul inferior este sărăcit în aerosoli.

Precipitațiile, ploi sau zăpezi, purifică atmosfera de praf, particulele de praf sunt sorbite la suprafața picăturilor de ploaie sau aderă la fulgii de zăpadă și cad pe pământ. Sărurile de potasiu din atmosferă (solubile), provenite din apa mării, sunt „spălate” de apa de ploaie (dizolvate) și cad odată cu aceasta pe pământ.

Urmează, în ordinea contribuției la radioactivitatea aerosolilor, stropii fini de apă marină care se formează la suprafața mărilor datorită zbuciumului continuu al acestora și a valurilor care se ridică și cad continuu la suprafață. Vântul rupe de pe crestele valurilor stropi de apă și îi poartă la distanțe mari. Curenții de convecție ridică acești stropi fini la înălțimi mari la care sunt apoi transportați pe orizontală, departe de locul unde s-au format. În timpul peregrinării prin oceanul aerian, apa din acești stropi se evaporă și rămân sărurile marine sub forma unor cristale mici ($0,1 \div 10 \mu\text{m}$) care conțin acei izotopi radioactivi care sunt prezenți și în apa mării (K, Rb, U, etc.).

Stropii de apă marină constituie și principala sursă de aerosoli care conțin izotopul radioactiv ^{14}C .

Dacă ținem seama de faptul că și alți izotopi radioactivi sunt prezenți în apa marină (^{87}Rb , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , etc.), rezultă că Oceanul Planetar contribuie consistent la radioactivitatea atmosferică, prin aerosolii marini.

O altă sursă de aerosoli o constituie praful organic, format din praf de plante, bacterii, mușcari de ciuperci, ouă de insecte, spori de mușchi, etc. Acest praf, numit în biologie „acropanton”, se poate deplasa pe distanțe foarte mari și formează centrii de sorbție a celor mai mici particule radioactive de origine naturală sau artificială.

O cantitate imensă de praf (cenușă), cu un grad de radioactivitate ridicat (U, etc.), este aruncat în atmosferă în timpul erupțiilor vulcanice. Cenușa vulcanică ajunsă la înălțimi mari este purtată de vânt timp îndelungat în jurul Pământului și, încet-încet, sub acțiunea gravitației, acest praf cade spre Pământ sau este antrenat de precipitațiile atmosferice care „spală” atmosfera.

În ceea ce privește sursa chimică de aerosoli, diferiți autori au estimat că în 24 ore, pe Pământ cad între $100 \div 5000$ tone de praf cosmic. El poate proveni din:

- ☐ arderea meteoriților ce ajung în atmosfera terestră;
- ☐ corpuri cosmice mari care se ciocnesc cu mare forță de suprafața Pământului, sfărâmându-se în fragmente de diferite dimensiuni, până la cel mai fin praf;
- ☐ nori de materie interstelară care, plutind prin spațiul interstelar galactic, ajung în zona sistemului nostru solar și intră în sfera de atracție gravitațională a Pământului.

Potasiul de origine meteorică din atmosferă reprezintă cam $(10^{-2} \div 10^{-1})$ %, iar ^{40}K are o abundență izotopică mare, care variază de la un meteorit la altul ($1 \div 5\%$) (în timp ce în potasiul de origine terestră este de numai 10^{-2} %)

În afară de potasiu, în meteoriții căzuți pe Pământ (deci și în praful meteoric) s-au identificat izotopi radioactivi de radiu, thoriu, uraniu, în concentrații care variază de la un meteorit la altul.

Admițând că pe Pământ cad zilnic 10^2 tone de praf cosmic, care conțin în medie 0,1% potasiu și considerând o abundență izotopică medie de ~ 3 % a ^{40}K în potasiul meteoric, s-a estimat că în 24 ore cad pe Pământ 3 g de ^{40}K , echivalent cu 20 μCi . Deși cantitatea estimată este mică, contribuția ^{40}K de origine cosmică la radioactivitatea atmosferică devine semnificativă deoarece ^{40}K are $T_{1/2}$ foarte mare ($\sim 10^9$ ani), iar viteza de cădere pe Pământ a particulelor de praf (dimensiuni $\sim 0,4 \mu\text{m}$ și densitatea $\rho \sim 1 \text{ g/cm}^3$) este mică chiar în atmosfera liniștită (cca. 100 m în 170 de zile).

Un agent poluant este și fumul. Indiferent de sursa care le produce, particulele de fum conțin izotopi radioactivi, în special ^{14}C , ^{40}K , dar și alți izotopi radioactivi. Fumul, în cantități mari este produs în atmosferă în perioadele secetoase când au loc incendii în păduri sau în câmpii, stepe și savane. De asemenea, observăm destul de frecvent cum adevărați nori de fum ies, învălătucindu-se, prin coșurile fabricilor. Pentru a reduce poluarea, prea mare în zona fabricilor respective, coșurile se fac cât se poate de înalte, pentru ca fumul să se împrășteie pe spații mai întinse și să se „dilueze”.

Răspândirea fumului de la aceste coșuri în atmosferă depinde de condițiile atmosferice, așa cum se observă în figura 9.1.

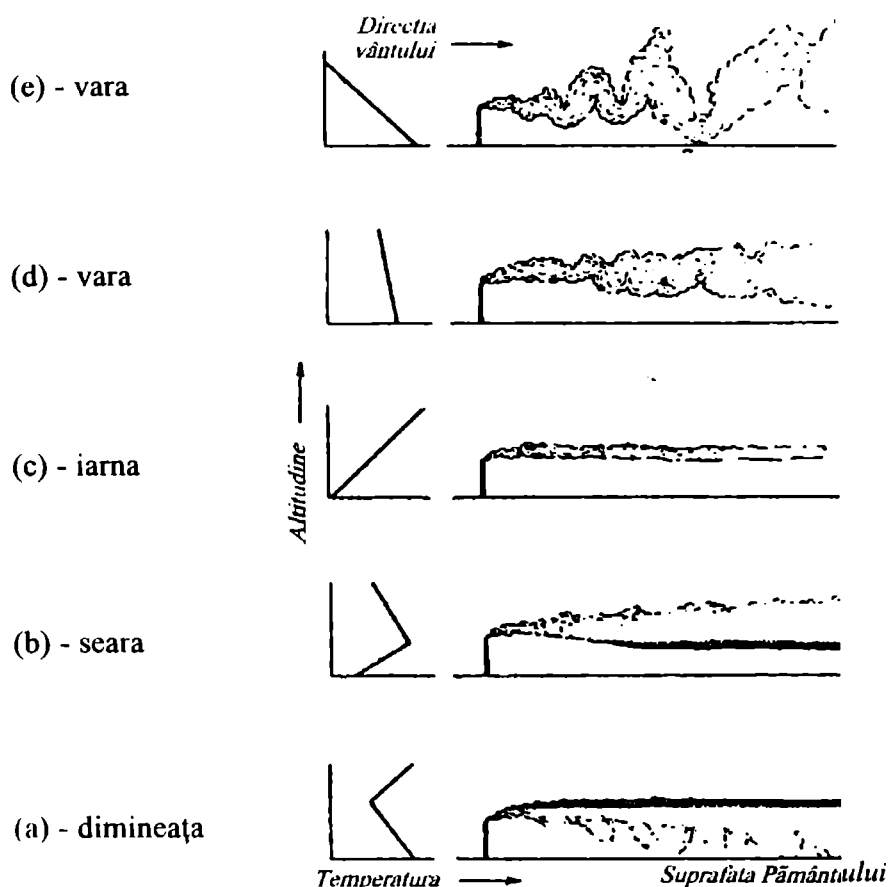


Figura 9.1: Împrăștierea fumului de la un coș de fabrică în funcție de direcția vântului și de variația temperaturii cu altitudinea.

Se observă că cea mai favorabilă situație pentru zona fabricii este seara, la apusul Soarelui, când aerul de sub firul de fum la nivelul solului este mai rece decât cel de deasupra și formează un fel de ecran care nu permite ca fumul să difuzeze spre Pământ (b). Situația cea mai nefavorabilă este dimineața, când aerul mai rece este deasupra firului de fum, iar sub fir aerul este mai cald (razele soarelui încălzesc Pământul și aerul de lângă sol) permițând difuzia fumului spre sol (a).

Într-o zi însorită de iarnă, fără vânt, fumul pleacă orizontal din cosul fabricii și se propagă la distanțe mari fără să difuzeze în sus sau în jos (c). O situație opusă se observă în zilele senine de vară, când curenții de convecție destramă și învâltuiesc fumul, mărind poluarea chimică și radioactivă în zona fabricii (d) și (e).

9.4. EMANAȚII RADIOACTIVE ÎN ATMOSFERĂ

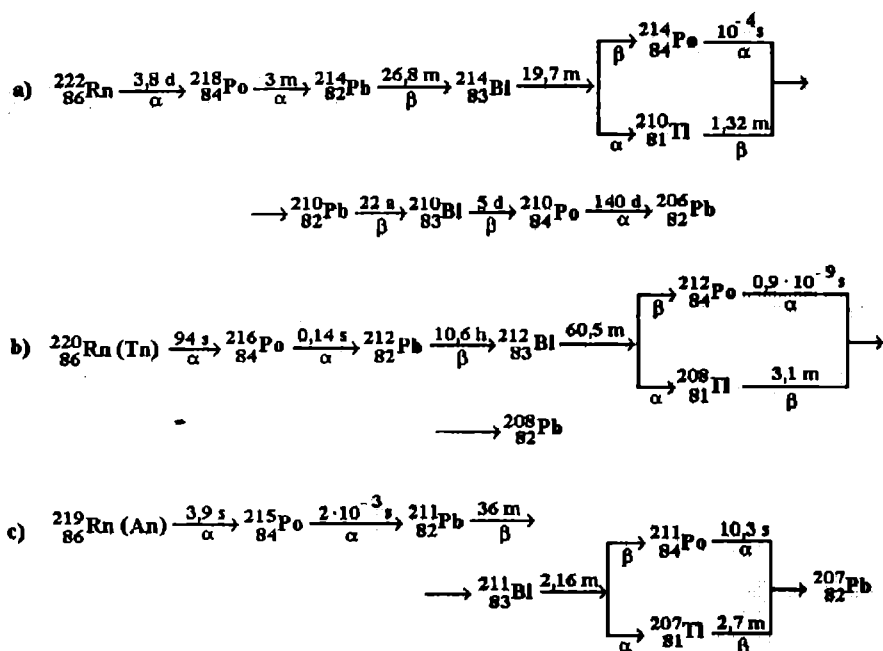
Contribuția cea mai mare la radioactivitatea atmosferică o dau emanațiile radioactive și descendenții lor. Cei trei izotopi radioactivi ai radonului, cunoscuți sub denumirile de radon ($^{222}_{86}\text{Rn}$, $T_{1/2} = 3,8$ zile), thoron (Tn sau $^{220}_{86}\text{Rn}$, $T_{1/2} = 55,6$ sec), și actinon (An sau $^{219}_{86}\text{Rn}$, $T_{1/2} = 3,9$ sec) produși prin dezintegrarea în lanț a ^{238}U , ^{232}Th și respectiv a ^{235}U , sunt prezenți în

aerul din porii și capilarele rocilor și solurilor care conțin izotopi radioactivi ai uraniului și ai thoriului. Prin difuzie și schimb mecanic aceste emanații ajung în aerul atmosferic din vecinătatea solului. Curenții de aer verticali și orizontali antrenează radonul radioactiv spre straturile mai înalte ale atmosferei și-l împrăstie în toate direcțiile. Concentrația fiecărui tip de emanație în atmosferă depinde de răspândirea nucleului-părinte (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th) în sol și roci, și de perioada de înjumătățire a izotopilor radioactivi de emanație.

Astfel, ^{222}Rn are cea mai mare concentrație în comparație cu Tn și An, deoarece și ^{238}U are concentrație mult mai mare decât a ^{235}U (și ^{232}Th) și $T_{1/2}$ mai mică decât a ^{232}Th . În plus, $T_{1/2}$ a radonului este mult mai mare decât a Tn și a An, ceea ce permite acumularea de radon în atmosferă în concentrații mai mari decât Tn și mai ales decât An, care au $T_{1/2}$ foarte mici și se dezintegrează rapid în vecinătatea suprafeței din care au fost emanați.

Contribuția la radioactivitatea atmosferică a emanațiilor este sporită de producții lor de dezintegrare, care sunt metale β și α radioactive, izotopi ai Po, Bi, Tl, Pb, cu $T_{1/2}$ ce variază de la câteva secunde la zeci de ani.

În schemele de mai jos se poate urmări lanțul dezintegrărilor fiecărei emanații, cu producții lor metalici de dezintegrare.



Este important de menționat că acești produși ai emanațiilor au o mare capacitate de aderare la aerosoli (praf, gheață, cristale de săruri), formând aerosoli radioactivi cu care cad apoi lent spre pământ.

Deși este dificilă o evaluare exactă a cantității totale medii de radon care emană zilnic în aerul atmosferic, unii autori au evaluat această cantitate ca fiind de ordinul a ~ 130 tone radon în 24 ore (vezi Perțov, 1964).

Mai importantă din punctul de vedere al sănătății oamenilor este observația că radonul se acumulează în încăperile închise ermetic (emană din pereți) în concentrații de $3 \div 6$ ori mai mari decât în atmosfera liberă din exterior. Radonul este un gaz „greu” și se acumulează în cele mai joase straturi atmosferice lipsite de ventilație. Astfel, în subsolurile clădirilor (neventilate) sau în mine (prost ventilate), concentrația de radon în aer este de $8 \div 25$ ori mai mare decât în atmosfera liberă din exterior.

Persoanele care locuiesc în subsoluri sau care lucrează în subteran (mine, metrou), sunt supuse impactului cu aceste concentrații mai mari de radon din aerul pe care-l respiră, iar statisticile arată o frecvență mai mare a cancerului pulmonar la aceste categorii de persoane, consecință clară a iradierii α și β la nivel pulmonar cu doze mai mari decât cele normale. Din aceleași motive, aerul este mai pur în vârf de munte (altitudine mare și ventilație bună) față de aerul din văile dintre munți sau din depresiuni.

Deși conținutul de ^{235}U , ^{238}U și ^{232}Th într-o zonă geografică dată este constant și este constantă și cantitatea de emanații rezultate din dezintegrare în unitatea de timp, se constată că în atmosferă conținutul de emanații radioactive în această zonă poate varia în timp în limite foarte largi (până la 2 ordine de mărime în 24 ore) în unul și același punct. Cauzele acestor variații sunt de natură climaterică și meteorologică: temperatură, presiune atmosferică, umiditate, vânt, starea morfologică a solului, etc.

Comportarea diurnă a radioactivității atmosferice este o funcție complexă de o serie de factori și aspectul ei trebuie corelat cu stabilirea aceluși proces care, la momentul dat, influențează cel mai puternic asupra concentrației emanațiilor în aerul de la suprafața solului.

În absența complicațiilor meteorologice, distribuția emanațiilor în atmosferă este condiționată de schimbul turbulent al aerului. În aceste condiții, valoarea maximă a radioactivității aerului se observă noaptea și dimineața, iar minimele după-amiaza, așa cum arată fig. 9.2.

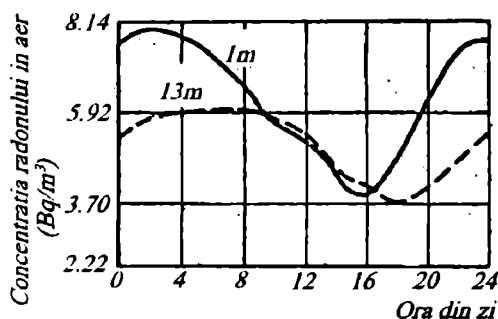


Figura 9.2: Distribuția emanațiilor în atmosferă

În orele după-amiezii se observă cea mai intensă schimbare a atmosferei, fapt care duce la egalizarea concentrației radonului pe înălțime și deci micșorarea concentrației lui la suprafața solului. În fig. 9.2 se observă cum variază concentrația de radon în 24 de ore la 1 m de sol și la 13 m: apare o diferență mare la miezul nopții și o egalizare în jurul orei 16. În zilele înnorate, amplitudinea acestor variații se atenuează puternic. Se observă o scădere puternică a radioactivității aerului când vântul bate puternic, vreme îndelungată, concentrația de emanații și de aerosoli radioactivi (descendenți ai radonului) variind asemănător. Când temperatura crește, se observă o scădere a concentrației radonului, în timp ce concentrația de aerosoli în vecinătatea solului crește puțin.

Când solul îngheață sau când plouă torențial, este redusă puternic exhalarea emanațiilor din sol, radioactivitatea atmosferei fiind mai mică și, în consecință, se observă și variații sezonale ale radioactivității atmosferice.

Cea mai mare concentrație de aerosoli radioactivi se observă în zilele reci și cu umiditate relativ mare (lunile septembrie, octombrie, noiembrie) care creează condiții

favorabile pentru condensarea vaporilor de apă, deci și a sorbției pe ei a produșilor de dezintegrare ai emanațiilor. În schimb, în lunile cu îngheț (decembrie, ianuarie, februarie, martie) sau cu temperatură ridicată (aprilie, mai, iunie, iulie) se observă o tendință de scădere a concentrației de aerosoli, deci și a radioactivității atmosferice în toate zonele geografice.

Alte observații au pus în evidență diferențe între aerul de deasupra mărilor și oceanelor și aerul de deasupra continentelor, concentrațiile de aerosoli radioactivi fiind de trei ori mai mari în aerul continental. Aerul de deasupra Antarcticii și Arcticii are o radioactivitate mult mai scăzută ($\sim 10^{-15}$ Ci /l $\sim 3,7 \cdot 10^{-5}$ Bq /l) față de zonele tropicale și zona ecuatorială.

În concluzie, se poate afirma că omul, care trăiește pe Pământ dar este practic „imersat” în atmosferă, este supus câmpului de radiații ionizante din atmosferă, format preponderent din radiații α , β , γ și neutroni. O parte a acestui câmp de radiații este generat de izotopii radioactivi aflați în sol, pe sol, în atmosferă și în apă, iar o altă parte provine din radiațiile cosmice care străbat atmosfera terestră, precum și din interacțiunile acestora cu ea și cu suprafața Pământului.

CAPITOLUL 10

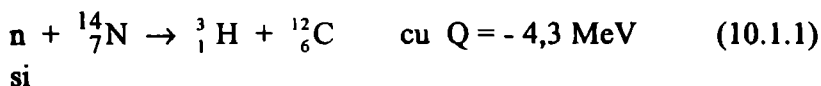
RADIOACTIVITATEA ȘI DINAMICA IRN ÎN APELE TERREI

10.1. RADIOACTIVITATEA APEI CHIMIC PURE ȘI A APEI NATURALE

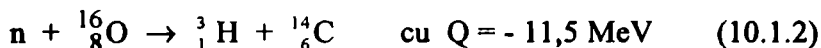
În natură nu există apă fără urme de radioactivitate. Chiar apa chimic pură este, de fapt, un amestec de ape chimic pure: apa ușoară (H_2O) în care oxigenul este combinat cu izotopul 1_1H al hidrogenului și apa tritiată sau supergrea (T_2O) în care oxigenul este combinat cu tritiul. Tritiul, izotopul greu 3_1H al hidrogenului (se notează cu T) este β^- - activ (cu $E_{\beta}^{max} = 18,6 \text{ keV}$).

Concentrația de apă tritiată este foarte mică în apa naturală, iar radioactivitatea apei chimic pure este foarte slabă.

Tritiul este produs în natură prin interacția neutronilor din radiația cosmică cu ^{14}N și ^{16}O din atmosferă, interacție descrisă de reacțiile (cu prag):



și



Ritmul de producere a tritiului în întreaga atmosferă este de aproximativ 2500 atomi $/(m^2 \cdot s)$, iar inventarul global de tritiu natural este estimat la circa $1,3 \cdot 10^{18} \text{ Bq}$. În acest inventar global este cuprins și tritiul generat direct din vântul solar și din interacția protonilor din radiația cosmică cu azotul, oxigenul și carbonul din atmosferă. Odată format în atmosferă, tritiul este rapid oxidat la apă tritiată care intră în circuitul hidrologic și apoi este dispersată în mediu conform schemei din fig. 10.1.

Activitatea specifică a apei chimic pure datorată tritiului natural este $A_s = 0,111 \text{ Bq/l}$ (sau 3 pCi/l).

Interesul pentru evaluarea corectă a acestei activități naturale a apei chimic pure s-a declanșat odată cu inițierea exploziilor termonucleare, generatoare de tritiu, care au mărit inventarul acestuia pe glob. Pe măsură ce s-a dezvoltat filiera nucleară de producere a energiei nucleare, au apărut tipuri de reactoare nucleare care contribuie, de asemenea, la inventarul global de tritiu sau, mai concret spus, la contaminarea cu tritiu a mediului.

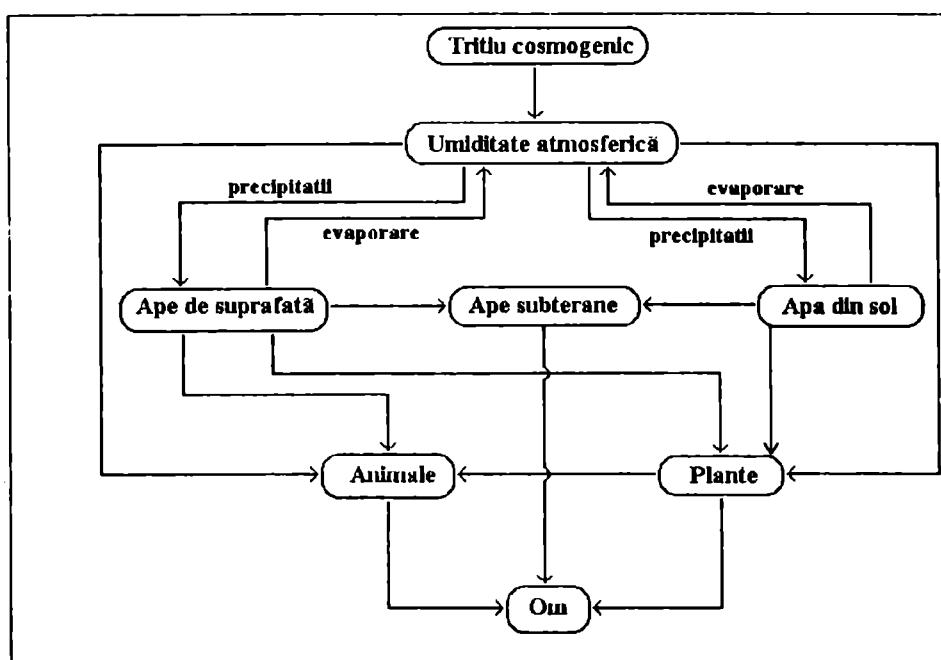


Figura 10.1: Schema circuitului hidrologic al tritiului cosmogenic.

Se știe că în natură nu există apă chimic pură. Cauza acestei situații este circuitul continuu al apei în mediu, contactul cu alte substanțe pe care le dizolvă, le erodează și le antrenează în acest circuit. Astfel, apele curgătoare conțin substanțe erodate, dizolvate și antrenate din roci; precipitațiile antrenează din aer diverse substanțe și impurități. Însă apa marină conține cea mai mare cantitate de substanțe minerale dizolvate, decât oricare altă apă. În structura sărurilor dizolvate sau numai antrenate, intră și elemente chimice care au izotopi radioactivi naturali și care fac ca apele naturale să fie caracterizate de o radioactivitate proprie, naturală, diferită de la caz la caz.

Astfel, concentrația naturală a tritiului în lacuri, râuri și ape potabile avea valori cuprinse între 5 și 20 pCi /l, înaintea începerii testelor nucleare.

Dintre variatele procese chimice și fizico-chimice care condiționează direct apariția și concentrația elementelor radioactive în apă, putem menționa:

- ☐ dizolvarea compușilor solizi care conțin elemente radioactive naturale;
- ☐ separarea elementelor radioactive din apă sub formă de depuneri pe fundul apelor (sedimente);
- ☐ absorbția de gaze radioactive (Rn, Tn, An) în apă;
- ☐ eliberarea gazelor radioactive din apă.

Există însă și o serie de fenomene fizice care influențează indirect radioactivitatea apelor naturale, cum ar fi:

- modificarea concentrației de izotopi radioactivi în masa de bază a apei, datorită evaporării apei sau transformării ei în gheață;
- condensarea vaporilor de apă, căderea precipitațiilor, topirea zăpezii și a ghețurilor au ca efect micșorarea radioactivității apei râurilor și a lacurilor;

■ amestecarea apelor cu diferite concentrații de elemente radioactive (la vărsarea râurilor unul în altul, sau în lacuri, mări și oceane);

■ presiunea atmosferică influențează concentrația de emanații în apele naturale prin echilibrarea presiunii gazelor (Rn, Tn, An) din apă, care tind să emane din apă în atmosferă; când presiunea atmosferică crește, concentrația acestor gaze radioactive în apă crește, fiind împiedicată emanația lor, și invers;

■ creșterea temperaturii apei are două efecte clare: pe de o parte, favorizează emanarea gazelor radioactive din apă, deci și scăderea concentrației lor, iar pe de altă parte, determină creșterea cantității de substanțe dizolvate, deci creșterea concentrației de ^{40}K , U și Ra.

10.2. RADIOACTIVITATEA APELOR CONTINENTALE

Apele continentale (sau de uscat) sunt ape curgătoare (râuri, izvoare, fluvii) sau stătătoare, ape de suprafață sau subterane (pânze freatice).

10.2.1. APE SUBTERANE

Apele subterane poartă cu ele amprenta solurilor și a rocilor în care s-au format, sub forma compușilor chimici dizolvați și a elementelor radioactive prezente în aceste ape naturale.

Apele din apropierea suprafeței terestre, numite și ape de sol (pânze freatice) sau de suprafață, se formează din precipitațiile atmosferice, iar radioactivitatea lor este, în esență, datorată ^{40}K din sărurile de potasiu pe care le-a dizolvat și le-a spălat din sol. Concentrația de izotopi radioactivi în aceste ape este puternic influențată de condițiile meteorologice și de umiditatea atmosferei. Apa din puțurile gospodăriilor țărănești are ca izvor aceste pânze freatice de apă din sol, care au o radioactivitate mică, generată mai ales de ^{40}K și care variază în funcție de zona geografică și de adâncimea la care se formează cu câteva ordine de mărime ($10^{-9} \div 10^{-12}$ Ci/l). Apele de la adâncimi mai mari sunt mai puternic mineralizate și au un conținut mai mare de ^{40}K .

O altă categorie de ape subterane o formează apele care s-au acumulat la nivelul primului strat de rocă impermeabil. Conținutul de izotopi radioactivi al acestor ape este determinat de conținutul lor în rocile pe care le spală. De asemenea, există acumulări de ape subterane între straturile impermeabile ale unor roci sedimentare. Aceste ape au un conținut mai mare de ^{40}K decât celelalte tipuri de ape subterane. În plus, s-a stabilit că apele de strat formate în vecinătatea zăcămintelor de petrol conțin cantități relativ mari de radiu (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra rezultați din dezintegrarea ^{238}U și ^{232}Th), în timp ce conținutul de uraniu, thoriu și alți izotopi radioactivi este mult mai mic. Concentrația radiului în apele de zăcămintă petrolier atinge valori mari, de ordinul $10^{-8} \div 10^{-10}$ g/l, în timp ce apele de strat care nu sunt formate în apropierea zăcămintelor de petrol au, de regulă, concentrații mult mai mici.

În orice caz, apele subterane conțin ^{40}K , izotopi radioactivi ai radiului, uraniului și thoriului (Rn, Tn, An) care, în ansamblul lor, conferă o radioactivitate (α , β , γ) proprie fiecăreia, condiționată de concentrația acestor elemente radioactive în straturile în care s-au format și pe care le-au spălat.

Campioni din punct de vedere al radioactivității, în special prin conținutul de radium, sunt izvoarele minerale. Printre acestea, sunt așa-numitele „izvoare radioactive”, a căror activitate specifică depășește valori ca 218 Bq /l pentru radon sau 3,7 Bq /l pentru radium, și concentrații de uraniu mai mari decât $3 \cdot 10^{-5}$ g /l, fiind cunoscute și ca ape radonice, ape cu radium, ape uranice.

10.2.2. RÂURI

Radioactivitatea apelor râurilor este determinată de o serie de factori:

- ☐ sursele de alimentare cu apă (care pot fi subterane sau de suprafață);
- ☐ schimbarea anotimpurilor;
- ☐ condițiile meteorologice;
- ☐ prezența particulelor solide insolubile sub formă de suspensii (amestec mecanic) în apa râurilor;
- ☐ zona geografică pe care o străbat.

Acești factori determină gradul de mineralizare și neomogenitatea compoziției chimice a apei râurilor, deci și a radioactivității ei. În consecință, gradul de radioactivitate al apei unui râu variază de-a lungul cursului apei, variază în funcție de anotimp și de condițiile meteorologice, depinde de gradul de „tulbureală” a apei, etc.

Sursele de suprafață provin din topirea zăpezii, a ghețurilor și din ploaie. Apele lor spală numai straturile superficiale ale solului și suprafața rocilor din drumul lor, antrenând o parte din substanțele radioactive conținute în acestea.

De asemenea, ploile și ninsorile „spală” atmosfera de impuritățile radioactive și cel puțin o parte din ele ajung în sursele de alimentare de suprafață sau direct în apa râurilor.

Studiile de hidrogeologie au arătat că sursele subterane de alimentare cu apă a râurilor sunt pânzele freatice sau izvoarele subterane și au un grad mai mare de mineralizare și de radioactivitate decât sursele de suprafață.

Evident că unul și același râu poate avea surse de alimentare atât subterane, cât și de suprafață. Ponderea diferitelor surse de apă la debitul acestui râu variază puternic atunci când se schimbă anotimpurile, pentru că în aceste perioade condițiile meteorologice se modifică drastic.

Rezultă că radioactivitatea apei de râu este o caracteristică puternic variabilă în timp și spațiu. Totuși, studiile sistematice au evidențiat și unele regularități, cum ar fi:

- ☐ Apele râurilor a căror sursă dominantă este subterană sunt mai radioactive decât cele a căror sursă dominantă este de suprafață.
- ☐ Principalele elemente radioactive naturale conținute în apa de râu sunt: K, U, Th, Ra și Rn.
- ☐ În perioadele secetoase, când nivelul apelor scade, crește concentrația de izotopi radioactivi naturali: alimentarea sa se face preponderent prin surse subterane, mai radioactive.
- ☐ În perioadele bogate în precipitații scade, de regulă, radioactivitatea apelor de râu.
- ☐ În perioadele de iarnă, când se formează strat de gheață la suprafața râurilor, crește concentrația de gaze radioactive (Rn, Tn).

- Activitatea specifică dominantă a apei de râu este generată de emițătorul β ^{40}K și este, în medie, de $\sim 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq / l}$, cu un ordin de mărime mai mare decât cea generată de emițătorii α (U, Th, Ra: $\sim 3,7 \cdot 10^{-3} \div 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ Bq / l}$). Există râuri la care concentrația de U și Ra este considerabil mai mare față de medie, fapt observat la râurile care colectează ape din zone uranifere sau care sunt masiv alimentate de izvoare subterane.
- Radioactivitatea apei de râu este o caracteristică oscilantă, cu amplitudini mari, în funcție de schimbările sezoniere.

10.2.3. LACURI

Ca și în cazul apei de râu, radioactivitatea apei diferitelor lacuri este strâns legată de compoziția chimică a râurilor și a izvoarelor subterane care alimentează lacul, dar este diferită de radioactivitatea acestora. Diferența de radioactivitate este determinată de faptul că în lacuri apa staționează un timp îndelungat. În acest timp, o mare parte din apă se evaporă și concentrația compușilor chimici crește, astfel încât radioactivitatea apei din lac devine mai mare decât cea a râurilor afluențe.

Această diferență de radioactivitate este deosebit de pregnantă în zonele geografice cu climă uscată, unde pierderea de apă prin evaporare este mai mare decât aportul de apă al râurilor. În aceste condiții se produce o scădere a stocului de apă din lac și o acumulare de săruri și de elemente radioactive.

Activitatea specifică a probelor de apă dintr-un lac depinde, de regulă, de poziția punctului în care a fost colectată proba (în special la lacurile de dimensiuni mari), de distanța față de zona de vărsare a râurilor în lac, de anotimp, de condițiile meteorologice, etc.

O activitate specifică destul de ridicată, se observă la apa lacurilor sărate, ea datorându-se, în special, izotopului radioactiv natural ^{40}K .

Lacurile mari de pe planetă (Baikal, Michigan, Marea Moartă, etc.) au activitatea specifică medie cuprinsă în limite largi: $3,7 \cdot 10^{-3} \div 37 \text{ Bq / l}$.

O parte din sărurile aduse de râuri se depun pe fundul lacurilor, loc în care se acumulează și elemente radioactive, radioactivitatea depunerilor de pe fundul lacului fiind dată, în esență, de ^{40}K , dar și de Ra, U, Th.

O parte din izotopii radioactivi naturali de origine cosmogenă (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{39}Ar), prezenți în mări și oceane, sunt produși în atmosferă și ajung în mări și oceane odată cu precipitațiile atmosferice.

10.3. RADIOACTIVITATEA NATURALĂ A MĂRILOR ȘI A OCEANELOR

Mediul marin și cel oceanic sunt formate din mai multe componente, fiecare dintre ele contribuind la radioactivitatea mărilor, respectiv a oceanelor.

Principala componentă este „apa marină” (sau „apa oceanică”), formată din apa propriu-zisă și sărurile minerale dizolvate în ea. Apa marină conține în concentrație mare săruri minerale dizolvate (în medie 35 g/l) și este, mai degrabă, o soluție de mai multe săruri dizolvate.

O altă componentă este formată din particulele minerale și organice aflate în suspensie în apa marină (amestec mecanic), care tind să se depună pe fundul mării. O parte din ele rămân sub formă de sedimente, altele sunt din nou amestecate cu apa marină.

Fundul apei, format din nisip, argile, nămol, sedimente organice, corali, etc., este, ca și în cazul lacurilor și râurilor, componenta cu rol de interfață între mediul acvatic și scoarța terestră, și conține elemente radioactive naturale.

Organismele vii care populează mediul marin (oceanic), datorită contactului intim cu apa marină, cu suspensiile solide sau cu fundul mării, s-au format și trăiesc în prezența izotopilor radioactivi naturali prezenți în acest mediu. Datorită schimbului continuu de substanțe cu acest mediu, organismele vii au, la rândul lor, o radioactivitate naturală proprie, datorată izotopilor radioactivi naturali preluați din apă și care „staționează” mai mult sau mai puțin în interiorul lor.

10.3.1. APA MARINĂ

Radioactivitatea naturală a apei marine este direct dependentă de salinitatea ei. În plus, concentrațiile relative ale diferitelor săruri în apa marină rămân aproximativ constante atunci când salinitatea apei (concentrația totală de săruri) variază din diverse cauze. Această observație face posibilă estimarea salinității apei marine într-un punct dat, dacă se determină concentrația numai pentru una din sărurile dizolvate în proba de apă marină prelevată din acel punct.

Ionii cu cele mai mari concentrații în apa marină sunt cationii de sodiu (~ 31%), magneziu (~ 4%), calciu (~ 1%), potasiu (~ 1%) și anionii de clor (55%), sulfat (~ 8%), carbonat (~ 0,2%), brom (~0,2%), dar în apa marină sunt prezente și alte elemente chimice, în concentrații mult mai mici.

Din aceste date rezultă clar că radioactivitatea apei marine este esențial determinată de ^{40}K . Concentrația altor elemente chimice care conțin izotopi radioactivi naturali este nesemnificativă, iar elementele chimice care au concentrație mare în apa marină nu au izotopi radioactivi naturali cu abundență izotopică semnificativă.

Știind salinitatea apei marine (35 g /l), concentrația elementului potasiu (1%) și abundența izotopică a ^{40}K ($1,19 \cdot 10^{-2} \%$) și $T_{1/2}$ ($1,3 \cdot 10^9$ ani), sau activitatea specifică a unui gram de potasiu natural (29,6 Bq /g), se poate determina nivelul mediu de radioactivitate β a apei marine generată de acest izotop radioactiv natural: $A_{\beta} = 174$ Bq/l. Rezultatul concordă cu măsurătorile directe ale radioactivității apei marine în diferite zone din Oceanul Atlantic și Pacific.

Salinitatea unei probe de apă marină variază în funcție de marea sau oceanul din care s-a prelevat proba, de poziția punctului de prelevare față de mal și de gurile de vărsare ale unor râuri și fluvii în mare (care, de regulă, „îndulcesc” apa mării în zona de vărsare), de adâncime, de condițiile climatice (zonă uscată sau umedă), de anotimp, etc. Variații mari ale salinității apar la probele de apă marină din zonele litorale. Astfel, s-au măsurat salinități foarte mici (3 g /l) în raport cu media (35 g /l), în unele zone litorale (golf) din partea nordică a Mării Baltice și salinități extrem de mari (~ 360 g /l) în zone litorale (golf) din Marea Caspică.

În largul oceanelor, salinitatea apei marine este mult mai constantă în raport cu poziția geografică și adâncimea punctului de prelevare și apropiată de salinitatea medie (35 g /l). Volumul uriaș ocupat de Oceanul Planetar (mări + oceane), estimat la aproximativ $1,37 \cdot 10^9$ km³, conține o cantitate totală imensă de ^{40}K care poate fi estimată relativ ușor.

În afară de ^{40}K , în apa marină se află în concentrații mult mai mici izotopi radioactivi naturali care sunt prezenți și în apele râurilor și fluviilor și pe care acestea le varsă continuu în mări și oceane: ^{87}Rb , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{14}C , ^3H .

Concentrația acestora în apa marină este, de regulă, mai mare decât în apa râurilor datorită stocării lor în mări și oceane.

În tabelul 10.1 sunt date cantitatea totală de izotopi radioactivi naturali în Oceanul Planetar, precum și activitatea specifică și activitatea totală a Oceanului Planetar, generată de fiecare izotop radioactiv natural în parte.

Din acest tabel se observă că Oceanul Planetar are înmagazinat în el cantități imense din acești izotopi radioactivi naturali, dar care, dispersate pe un volum global de asemenea imens de apă, dau concentrații foarte mici.

Concentrațiile izotopilor radioactivi naturali ai K, U, Th, Ra în apa marină, sunt cu ordine de mărime ($10^2 \div 10^6$) mai mici decât în rocile vulcanice de origine.

În același timp, cantitatea de ^{14}C într-un litru de apă marină este de ~ 300 de ori mai mare decât în cea de un litru de aer, iar rezerva de ^{14}C din apa marină globală este de ~ 100 de ori mai mare decât cea din atmosferă.

Tritiul este conținut numai în stratul superficial al apelor marine (grosime $50 \div 100$ m), acolo unde are loc eficient schimbul cu aerul atmosferic.

Evident, dată fiind prezența izotopilor radioactivi naturali ai U și Th în apa marină, vor fi prezenți și izotopi radioactivi naturali ai radonului, dar care, ca și radiul, niciodată nu vor fi în echilibru radioactiv cu izotopii radioactivi naturali părinți, din cauza veșnicei agitații specifice mărilor și oceanelor. Echilibrul radioactiv este subminat și de alte fenomene care fac ca apa marină să fie sărăcită în radium, fără să afecteze conținutul în uraniu și thoriu. Astfel, cantități importante de Ra se acumulează în țesuturile plantelor și animalelor marine, sărăcind apa marină în acest element. Un alt aspect, se referă la faptul că izotopii Ra au ca părinți *directi* izotopi ai elementului toriu, care precipită cu hidroxidul de fier și se depune pe fundul apei, ducând cu el și rezerva potențială de Ra.

Tabelul 10.1: Concentrația și activitatea specifică a izotopilor radioactivi naturali în apa marină, cantitatea acestora în Oceanul Planetar și activitatea specifică a Oceanului Planetar [ref.4]

Izotop	Conc. medie a elementului chimic în apa marină (g/l)	Activitate specifică (Ci/l)	Cantitatea totală de IR naturali în Oceanul Planetar ($\times 10^6$ tone)	Activitatea totală în Oceanul Planetar ($\times 10^6$ Ci)
^{40}K	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	63000	424700
^{87}Rb	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-12}$	115000	7530
^{238}U	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-12}$	2700	14
^{235}U	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-14}$	21	41
^{232}Th	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-13}$	14	1,4
^{226}Ra	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	410
^{14}C	$4 \cdot 10^{-14}$	$1,76 \cdot 10^{-13}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	240
^3H	$8 \cdot 10^{-17}$	$0,8 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	1090

În mod similar, ^{40}K pe de o parte se fixează pe detrit și împreună cu ele se depune pe fundul mării, iar pe de altă parte este consumat de plantele și animalele marine în cantități mari.

În figura 10.2 este schițată dinamica izotopilor radioactivi naturali U, Th, Ra în mediul marin, cuprinzând sursele care alimentează cu izotopi radioactivi mările și oceanele și căile de dispariție a acestora din apa marină, care explică lipsa echilibrului radioactiv între uraniu și radium.

Radioactivitatea apei marine din Marea Neagră este condiționată de conținutul în izotopi radioactivi a principalelor ape ce se varsă în ea. Dintre acestea, se remarcă prin conținutul ridicat de uraniu Dunărea ($(0,65 \div 0,2) \cdot 10^{-6} \text{ g/l}$), Nistrul (10^{-6} g/l), Niprul ($1,7 \cdot 10^{-6} \text{ g/l}$) și Donul ($3,3 \cdot 10^{-6} \text{ g/l}$).

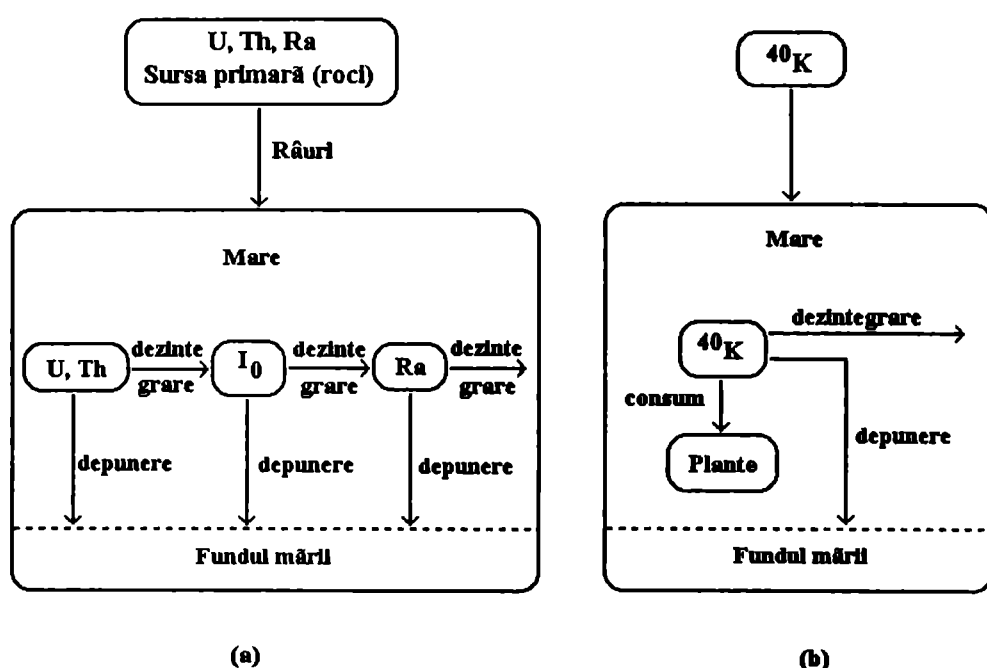


Figura 10.2: Dinamica izotopilor radioactivi naturali U, Th, Ra și ^{40}K în mediul marin

$$(I_0 = \text{Th})$$

Salinitatea Mării Negre în preajma malurilor unde nu se varsă nici un râu este de aproximativ $15 \div 18 \%$, în apele de adâncime este de $\sim 22,5 \%$, iar în zona golfului Bosfor, unde vin apele din Marca Marmara, salinitatea crește mult. Condițiile hidrologice și geochemice specifice Mării Negre (de ex: râuri mari care se varsă în ea și îi diluează apa, cantități mari de aluviuni vărsate în apa mării, comunicarea cu alte mări prin canale înguste de mică adâncime, evaporarea slabă la suprafață, etc.) fac ca apa acestei mări să aibă concentrațiile de uraniu ($2 \cdot 10^{-6} \text{ g/l}$) și de radium (10^{-13} g/l) asemănătoare celor medii din Oceanul Planetar ($2 \cdot 10^{-6} \text{ g/l}$) deși salinitatea ei este jumătate din cea oceanică. În același timp, concentrația medie de thoriu ($22 \cdot 10^{-9} \text{ g/l}$) este mult mai mare decât cea oceanică.

10.3.2. SEDIMENTELE MARINE

Conținutul de elemente radioactive naturale în sedimentele de pe fundul mărilor și oceanelor este strâns legat de originea acestor sedimente.

În general, sedimentele din zonele litorale sunt formate din materiale aduse de afluenți de pe continente: nisip în vecinătatea malurilor, argile și nămol la ape mai adânci, iar izotopii radioactivi naturali conținuți sunt preponderent U, Th, Ra.

Aceste materiale de origine continentală nu ajung în zona mărilor deschise. În aceste zone, sedimentele sunt dominant de origine organică și variază de la o zonă geografică la alta în ceea ce privește structura, culoarea, etc. S-a estimat că pe fundul Oceanului Planetar se depun anual 10^9 tone de sedimente organice sub formă de nămol organic, calcare, schelete, etc.

Radioactivitatea acestor sedimente este esențial generată de izotopul radioactiv natural ^{40}K , care este conținut în concentrații mari în plantele și animalele marine, mult mai mari decât în apa marină în care trăiesc. Prin moartea și descompunerea acestor organisme, o mare parte din masa acestora se depune pe fundul apei, și odată cu ea ^{40}K care mărește radioactivitatea sedimentelor marine. În consecință, o concentrație deosebit de mare de ^{40}K în sedimente se constată în acele zone marine unde concentrația de biomasă este foarte mare.

În măsurătorile de radioactivitate β (^{40}K) și α (U, Th, Ra) ale probelor (carote) de sedimente de pe fundul mărilor și oceanelor, s-au obținut activități specifice care variază cu zona geografică din care s-a colectat proba, cu adâncimea la care se află fundul mării în punctul respectiv și cu adâncimea în stratul de sediment (orizontul în strat) a probei măsurate, de solubilitatea compușilor elementului chimic. Măsurătorile făcute pe o coloană de sediment din fundul Mării Negre, cu grosimea totală de aproximativ 2 m, indică pentru uraniu concentrații care scad de la $8,2 \cdot 10^{-4} \%$ la aproximativ $10^{-4} \%$, pe măsură ce crește adâncimea stratului în coloană, în timp ce concentrația thoriului crește de la aproximativ $3 \cdot 10^{-4} \%$ în straturile superioare până la aproximativ $8 \cdot 10^{-4} \%$ în straturile mai profunde. O comportare similară cu a thoriului are concentrația radiului, care crește cu adâncimea stratului, de la $\sim 2 \cdot 10^{-11} \%$ la $8 \cdot 10^{-11} \%$.

Această comportare a concentrațiilor din sedimentele Mării Negre nu este una tipică (unde, de exemplu, Ra se acumulează în straturile superficiale ale fundului apei) și reflectă particularitățile acestei mări: o mare interioară, practic închisă, abundent alimentată cu material sedimentar de către fluvii și râuri mari.

10.4. RADIOACTIVITATEA APELOR ATMOSFERICE

Prin apa atmosferică, înțelegem, de fapt, apa care după ce s-a evaporat undeva la suprafața pământului s-a ridicat în atmosferă și de aici cade, din nou, pe suprafața pământului, sub formă de precipitații: ploaie, zăpadă, grindină, lapoviță.

Aceste precipitații sau ape suspendate cum mai sunt numite, au și ele o radioactivitate naturală generată de două componente:

- ☐ gazele radioactive din atmosferă (Rn, Tn, ^{14}C , ^3H);
- ☐ substanțele minerale suspendate în atmosferă sub formă de aerosoli.

Activitatea naturală specifică a precipitațiilor depinde de tipul acestora, de viteza de formare, de viteza cu care cad spre pământ, etc.

Din multiple măsurători efectuate înainte de începutul experimentelor nucleare, s-au stabilit activitățile specifice medii datorate radonului și produșilor săi de dezintegrare: ploaia torențială (500 Bq/l), ploaia mocănească (137 Bq /l), fulgii de zăpadă (137 Bq/kg), mazărice (740 Bq/kg), etc.

Primele valuri de ploaie sau de ninsoare sunt totdeauna mai radioactive decât următoarele, deoarece ele „spală” atmosfera, antrenând izotopii radioactivi naturali din atmosferă.

Radioactivitatea atmosferică scade de câteva ori în urma unei ploi zdravene, diferența găsindu-se în radioactivitatea apei de ploaie. La rândul lor, fulgii de zăpadă captează cu mare eficiență praful și fumul din atmosferă, cu conținutul lor de izotopi radioactivi naturali. Măsurătorile arată activități specifice mari la zăpada colectată în zonele industriale unde fumul de la coșurile fabricilor inunde atmosfera.

Componenta minerală a radioactivității precipitațiilor, conține printre alți izotopi radioactivi naturali și ^{40}K , a cărui concentrație este mai mare în zonele din vecinătatea mării.

Activitatea specifică a apei de ploaie datorată ^{40}K variază în limite destul de largi, atingând în unele zone valori mari, de ordinul a $4 \cdot 10^2$ Bq/l.

Aceste câteva elemente despre radioactivitatea precipitațiilor completează imaginea noastră despre circuitul izotopilor radioactivi naturali în cele trei medii ale planetei (hidrosferă, litosferă și atmosferă), subliniind rolul de interfață între ele al precipitațiilor.

În apele Oceanului Planetar trăiesc organisme vii cu un spectru larg în ceea ce privește gradul de complexitate, adaptate condițiilor naturale de viață, deci și fondului de radiații specific mediului marin.

Prin diversele sale activități, omul poate perturba drastic condițiile de viață naturale ale acestor organisme, cu consecințe ecologice dramatice, care-i pot afecta însăși viața.

Supravegherea permanentă a radioactivității mediului marin a devenit o preocupare deosebit de importantă, în prezent urmărindu-se depistarea și eliminarea surselor de poluare radioactivă.

CAPITOLUL 11

RADIOACTIVITATEA NATURALĂ A ORGANISMELOR VII

11.1. INTRODUCERE

Organismele vii sunt sisteme biologice cu grad de complexitate diferit, începând cu organisme de tip celular (virusuri, viroizi, plasmide, etc.) și terminând cu cele mai complexe organisme (plantele, animalele și omul).

Există virusuri de dimensiuni foarte mici, cu programul genetic format din câteva gene care formează o macromoleculă de ARN, iar la plasmide, cele câteva gene formează o macromoleculă de ADN liniar sau circular.

Bacteriile sunt organisme monocelulare, nucleul lor celular conținând un singur cromozom circular pe care sunt dispuse cele aproximativ 3000 de gene care formează programul genetic.

Este interesant de specificat că celulele bacteriene servesc drept gazdă organismelor procariote (virusuri, plasmide). Într-o celulă bacteriană trăiește o adevărată colonie de astfel de chiriași (10 + 200 plasmide pe celulă). Acești chiriași se replică independent de materialul genetic al celei gazdă și au capacitate de autoreglare și autodezvoltare. Studiile efectuate arată că există un permanent schimb de informație reciprocă între diversii chiriași, dar și între ei și gazdă, fapt care le permite adaptarea la mediu și evoluția propriilor organisme. În condițiile unui tratament cu antibiotice, plasmidele au acumulat câteva gene noi care le conferă rezistență la aceste antibiotice, deci s-au adaptat la mediu.

Organismele cele mai complexe care există pe Pământ au sistemul genetic mult mai mare și mai complex. Astfel, plantele superioare au circa 15.000 de gene, iar mamiferele câteva zeci de mii. Această structură genetică complexă le face, pe de-o parte, mai vulnerabile față de intruși, de tipul virusurilor și plasmidelor care invadează celulele organismului. De asemenea, interacția radiațiilor ionizante cu macromoleculele uriașe pe care se află dispuse programele genetice la organismele complexe produce multiple defecte care sunt mai greu de reparat în totalitate decât în cazul unor macromolecule mai mici. Astfel, sunt posibile mutații genetice. Pe de altă parte, organismele complexe, ca și cele simple, sunt sisteme deschise informațional, astfel că între ele și mediul înconjurător are loc un permanent schimb de informații, care le-a permis adaptarea la mediu.

Așa se explică faptul că organismele vii complexe au supraviețuit și au evoluat chiar în condițiile în care sunt continuu supuse iradierii cu radiații de origine cosmică și terestră: programul lor genetic conține (probabil) gene care le conferă rezistență la iradierea cu anumite doze corespunzătoare fondului natural de radiații.

Organismele vii sunt sisteme deschise și în sensul schimbului de materie cu alte organisme vii și cu mediul în care trăiesc. Aceasta face ca în organismele lor să pătrundă odată cu elementele necesare hranei, elemente radioactive, care pot staționa un timp mai lung sau mai scurt în interiorul organismului, după care sunt eliminate total sau parțial sau se dezintegrează.

Astfel, se poate vorbi despre o radioactivitate naturală a organismelor vii, în special a plantelor, a animalelor, a omului.

11.2. RADIOACTIVITATEA PLANTELOR. SCHIMBUL DE IRN CU MEDIUL ÎNCONJURĂTOR

Organismele vegetale au capacitatea de a sintetiza substanțe hrănitoare din substanțe anorganice. În timpul proceselor biologice, odată cu elementele necesare hranei lor, asimilează și depun în țesuturi izotopi radioactivi naturali și artificiali existenți în aerul, apa și solul care le hrănesc.

Datorită acestei capacități de sinteză a substanțelor organice din elementele materiei anorganice, plantele au parcă rolul de a extrage elementele radioactive naturale din substanțele neorganice și de a le transmite lumii vii prin diferite lanțuri alimentare.

În structura materiei vii organismele vegetale constituie partea dominantă. Masa totală a diferitelor organisme vii este estimată la aproximativ 10^{18} tone, în care ponderea substanței vegetale este de $10^4 \div 10^6$ ori mai mare decât a substanței animale care populează planeta.

Rezultă că organismele vegetale constituie rezervorul principal de elemente radioactive care intră continuu în circuitul substanțelor în biosferă pe măsură ce mor sau sunt consumate de animale ierbivore.

Data fiind varietatea izotopilor radioactivi răspândiți în natură și asimilați în plante, acestea conțin, de regulă, emițători α , β și γ , evident cu contribuții diferite la radioactivitatea globală a unei plante date și cu rol biologic diferit în dezvoltarea plantei.

11.2.1. FACTORI CARE DETERMINĂ ACUMULAREA DE IR ÎN PLANTE

S-a observat că acumularea diferitelor elemente chimice, deci și a izotopilor radioactivi corespunzători, se face în două variante diferite. Astfel, există circa 30 - 40 elemente chimice printre care potasiu și uraniu, pe care toate plantele le asimilează în concentrații mari, dacă zona în care cresc (mediul hrănitor) este bogată în astfel de elemente. Fenomenul este numit *concentrație grupală*. Toate plantele cultivate pe un teren căruia i s-au administrat îngrășăminte potasice vor avea o concentrație mai mare de potasiu (deci și ^{40}K) decât același tip de plante cultivate pe un teren alăturat, dar fără adaos de îngrășăminte potasice. În mod similar, plantele cultivate și cele din vegetația spontană care cresc în zone uranifere au concentrații de uraniu mai mari decât plantele similare care cresc în zone obișnuite, neuranifere.

Există însă elemente chimice (și izotopii radioactivi corespunzători lor) care sunt acumulate cu predilecție numai de anumite plante. Aceste plante vor avea totdeauna o concentrație mare a elementului respectiv, indiferent de condițiile oferite de mediu. Ele au o afinitate mare, o nevoie de elementul respectiv și uneori îl caută în adâncul Pământului cu

rădăcini puternice și lungi atunci când mediul hrănitor este sărac în acel element. În același timp, celelalte plante rămân pasive față de prezența sau absența unui astfel de element. Acest tip de acumulare de elemente chimice și de izotopi radioactivi aferenți se numește *concentrație selectivă*.

Studiul sistematic al acumulării de izotopi radioactivi în plante a condus la evidențierea cauzelor care determină aceste concentrări de izotopi radioactivi:

- ☐ izotopul radioactiv aparține unui element chimic cu rol biologic în dezvoltarea plantei (ex: hidrogen, carbon, calciu, potasiu, etc.)
- ☐ izotopul radioactiv aparține unui element fără rol biologic, dar care are proprietăți chimice asemănătoare cu cele ale unui element chimic cu rol biologic (mimetism chimic: stronțitul și radiul au proprietăți similare cu cele ale calciului)
- ☐ izotopul radioactiv există în concentrații mari în mediul hrănitor (apă, aer, sol) sub formă de substanțe solubile.

Izotopii radioactivi sunt absorbiți de plante prin suprafața biologică aflată în contact direct cu aceștia: la alge - prin membrana celulelor algale; la macrofite - prin suprafața rădăcinii, a tulpinii, a frunzelor, florilor și fructelor.

În mediul acvatic, izotopii radioactivi sunt absorbiți direct de plantele submerse. În mediul terestru, radionuclizii sunt preluați de plante în special din atmosferă (aerosoli, depuneri atmosferice, particule fine de sol antrenate de curenți de aer) prin fruze, tulpini, flori și fructe. De asemenea, plantele extrag din sol izotopi radioactivi, cu preponderență pe cei cu rol biologic în dezvoltarea lor, dacă aceștia se află sub formă de compuși solubili.

Acumularea de izotopi radioactivi în plante este condiționată de o serie de factori structurali sau de mediu, cum sunt:

- ☐ particularitățile fiziologice ale fiecărui tip de plantă și rolul biologic al izotopului radioactiv dat pentru planta dată;
- ☐ perioada de dezvoltare a plantei: creștere, înflorire sau coacere;
- ☐ partea plantei care acumulează izotopii radioactivi: rădăcina, tulpina, frunzele, florile, fructele;
- ☐ natura solului (bazic, acid, neutru, nisipos, argilos, cernoziom, etc.) sau a mediului acvatic (apă marină, apă dulce, etc.); solurile acide favorizează transferul izotopilor radioactivi din sol în plantă, în timp ce solul bazic frânează acest transfer;
- ☐ regimul termic în perioada dezvoltării plantei, condiții climatice (umiditatea aerului, a solului, etc.);
- ☐ momentul recoltării (ziua, noaptea);
- ☐ anotimpul recoltării etc.

11.2.2. REACȚIA PLANTELOR LA PREZENȚA IZOTOPILOR RADIOACTIVI

Reacția plantelor față de izotopii radioactivi prezenți în mediul hrănitor este funcție de tipul și de concentrația acestora în mediu și de concentrația izotopilor radioactivi din propriile țesuturi.

S-a observat că, dacă izotopii radioactivi se află în concentrații mici în mediul hrănitor, planta îi acumulează astfel încât concentrația din țesuturi crește atunci când crește concentrația din mediu, până când atinge o concentrație limită a izotopilor radioactivi în țesuturile ei. În aceste condiții, prezența izotopilor radioactivi în mediul hrănitor, deci și în țesuturile plantei, este benefică, având un rol stimulator în creșterea productivității plantei (de ex: crește conținutul de zahăr în sfecla de zahăr).

Nivelul de acumulare a izotopilor radioactivi în țesutul plantelor are o dependență bine determinată de conținutul acestora în mediul hrănitor, dar nu este o relație de proporționalitate deoarece depinde și de necesitățile fiziologice ale plantei.

Datorită adaptării plantelor la condițiile naturale de mediu, acestea posedă un sistem de autoreglare fiziologică a concentrației de izotopi radioactivi în plantă, care limitează superior aceste concentrații.

Factorii de concentrare (FC) pentru plantele din ecosistemele terestre pentru radionuclizii naturali sunt, de regulă, de ordinul unității (~ 1 pentru ^{40}K și ^{226}Ra), dar există și excepții: pentru ^{238}U , ^{226}Ra sau ^{232}Th sunt de ordinul sutelor la unele plante de tipul stufului sau *Elodea canadensis*.

Vegetația acvatică are FC mult mai mari pentru izotopi radioactivi naturali (^{40}K , ^{210}Pb , ^{238}U , ^{226}Ra) decât vegetația terestră.

Dacă izotopii radioactivi sunt prezenți în mediul hrănitor în concentrații mari, în exces față de nevoile plantei, efectul obținut este negativ: are loc oprirea plantei, frânarea activităților ei biologice.

Concentrații de radii de cca. $10^5 \div 10^7$ Bq /kg de sol sau concentrații de uraniu și toriu de cca. $10^8 \div 10^9$ Bq /kg de sol sunt considerate periculoase. Ele nu produc efecte imediate, vizibile la suprafața plantei, dar prin acțiunea de durată a radiațiilor emise ele afectează principalele organe și slăbesc planta în întregime.

Determinarea radioactivității naturale a vegetației spontane și a culturii se face sistematic, în scopul folosirii acestor valori ca parametri inițiali în modelele de estimare a dozelor de ingerare, dar și ca valori de referință în cazul contaminărilor radioactive. În România se fac astfel de măsurători sistematice.

11.2.3. EMITĂTORI α - NATURALI ÎN PLANTE: U, Th, Ra

Uraniul, deși nu are un rol biologic cunoscut, este totuși asimilat de plante. S-a constatat că este mai ușor de asimilat de către plantele care au predilecție pentru ioni de Na, Se, S și Ca (ex: coniferele), dar mai greu de asimilat de plantele care au predispoziție pentru asimilarea potasiului.

În cenușa plantelor (~ 10 % din masa plantei vii) crescute într-un sol normal, concentrația medie de uraniu este $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ grame U /kg de cenușă, iar la cele crescute într-un sol bogat în uraniu, concentrația medie este de zece ori mai mare. Din concentrația uraniului în cenușa diferitelor plante, s-a evaluat activitatea specifică a plantei vii sau a diferitelor părți ale plantei generată de ^{238}U . Astfel, pentru o serie de plante alimentare, activitățile specifice variază în funcție de partea de plantă studiată.

În zonele uranifere, concentrația uraniului în cenușa plantelor poate fi mult mai mare (cu $3 \div 4$ ordine de mărime !) decât în zonele normale. Geologii folosesc plantele pentru semnalarea prezenței zăcămintelor de uraniu.

Tabelul 11.1: Activitatea specifică generată de ^{238}U în unele plante alimentare (ref.[4])

Planta	Partea studiată	A_s (Bq /kg)
Mărar	frunze semințe	0,8 0,2
Telină	frunze rădăcină	8 2
Usturoi	bulb	12
Struguri	fruct	0,4

Thoriul este un element cu rol biologic necunoscut. Compușii săi chimici sunt insolubili. Contribuția thoriului la radioactivitatea α este mai importantă la plantele terestre decât la cele acvatice. În mediul acvatic, compușii insolubili ai thoriului se depun pe fundul apei, stricându-se echilibrul radioactiv Ra-Th, apa este sărăcită în thoriu, deci și plantele acvatice.

Radiul a fost folosit la cele mai complexe studii privind radioactivitatea α a plantelor. S-a studiat dependența concentrației de radiu funcție de: tipul plantei (în aceleași condiții de creștere), de sol și de condițiile climaterice (pentru același tip de plantă), de vârsta și faza de dezvoltare a plantei, de diferitele părți ale plantei (aerene, acvatice, etc.), de excesul de radiu în hrana plantei, etc. Așa s-a pus în evidență existența concentrațiilor periculoase de izotopi radioactivi în hrana plantei și a unor concentrații limită în țesutul plantei. Concentrațiile de Ra mai mici decât aceste concentrații limită în țesutul plantei au un efect stimulat în dezvoltarea și în productivitatea plantei, probabil prin stimularea reacțiilor fizico-chimice din organismul acesteia.

11.2.4. EMITĂTORI β ÎN PLANTE

Principalul emițător β conținut în plante este ^{40}K , dar sunt prezenți și ^3H , ^{14}C și ^{87}Rb .

Cauza prezenței ^3H și ^{14}C este structura țesuturilor plantelor care conțin H și C ca material structural. Prezenta ^{40}K în organismele vegetale este legată de rolul fiziologic foarte important pe care îl are elementul chimic K. Potasiul face parte din grupa elementelor organogene: el intră obligatoriu în structura substanței vii, fără el nefiind posibilă existența și dezvoltarea organismelor vii. Potasiul participă la reglarea accesului apei în țesutul plantei și reglează viteza de acumulare a CO_2 de către frunze, reglează transformarea hidraților de carbon (glucoză, fructoză, etc.) din săruri solubile în săruri insolubile (apret), reglează formarea unor fermenți. Insuficiența lui produce mari perturbări în organismul plantei.

Factorii de care depinde acumularea potasiului (deci și a ^{40}K) sunt multipli. Astfel, conținutul de potasiu este mai mare la planta matură decât la cea tânără. În solurile bazice, acumularea de potasiu de către plante este mai activă decât în cele acide. Unele plante (ex:

porumbul) prezintă fenomenul de „exoosmoză”, adică un ciclu zilnic al potasiului în plantă: ziua, concentrația de potasiu este mai mare datorită luminii solare care favorizează adăugarea potasiului la unii compuși organici din țesutul plantei; în întuneric această legătură dispare, iar potasiul este eliberat în aer și sol de întreaga plantă, iar radioactivitatea β a plantei scade. Temperatura mediului influențează asimilarea potasiului.

Dintre produsele alimentare cele mai bogate în ^{40}K putem aminti: bobul, mazărea, soia, fasolea. În tabelul următor sunt date activitățile medii specifice generate de ^{40}K pentru diferite plante.

Tabelul 11.2: Activitățile specifice medii generate de ^{40}K în unele plante alimentare (ref.[4])

Planta	Activitatea specifică medie (Bq /kg)
Mazăre	273,8
Fasole	347,8
Grâu	148
Orez	22,2
Cartof	129,5

Zilnic, omul primește prin produsele alimentare de origine vegetală $35 \div 350$ Bq de ^{40}K .

Vegetația cu viață lungă (arborii) acumulează cantități mari de ^{40}K . De exemplu, un pin de 100 de ani are $\sim 0,5$ kg de K și o activitate totală $\Lambda_{\text{total}}(^{40}\text{K}) = 16 \cdot 10^3$ Bq, iar un plop de 75 de ani are un kg K și o activitate totală de $30 \cdot 10^3$ Bq. Prin folosirea lemnului drept combustibil, odată cu fumul, ajunge în atmosferă și o mare parte din izotopul radioactiv ^{40}K conținut în arborii de origine a lemnului. În timpul verilor secetoase, când se produc frecvent incendii în păduri, o mare cantitate de ^{40}K este eliberată în atmosferă.

Activitatea totală a vegetației de pe planetă datorată ^{40}K este estimată la cca. 10^{13} Ci ($1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$ Bq).

Radioactivitatea β a plantelor datorată ^{87}Rb asimilat este cu $2 \div 3$ ordine de mărime mai mică decât cea generată de ^{40}K .

^{14}C și ^3H dau o contribuție mai mică la radioactivitatea plantelor ($4 \div 4 \cdot 10^2$ Bq /kg) iar ^{48}Ca are o contribuție practic la limita de observare (mazăre $4 \cdot 10^4$ Bq /kg; grâu $4 \cdot 10^6$ Bq /kg).

11.3. RADIOACTIVITATEA NATURALĂ A ORGANISMELOR ANIMALE

Acumularea de izotopi radioactivi în organismele animale are aceleași cauze ca și în cazul organismelor vegetale: nevoia organismului de un element chimic care are izotopi radioactivi naturali (cazul ^{40}K) sau mimetismul chimic al unor elemente chimice care au izotopi radioactivi naturali cu un element chimic necesar organismului animal (cazul Ra care

are proprietăți chimice similare cu cele ale Ca), fie abundența izotopilor radioactivi naturali în mediul hrănitor și asimilarea grupală a acestora de către organismele animale (cazul uraniului).

Deci, radioactivitatea naturală a diferitelor organisme animale este determinată de particularitățile lor structurale și fiziologice, precum și de radioactivitatea mediului în care trăiesc. În aceste condiții, este evident că ^{40}K , al cărui rol biologic este esențial pentru organismele animale și care se află în concentrații relativ mari în mediul acvatic și în cel terestru, dă contribuția principală la radioactivitatea β naturală a acestora.

Radiul, uraniul și thoriul, deși nu au un rol biologic cunoscut, ajung în organismele animale preponderent odată cu hrana sau apa și generează radioactivitatea α a acestora.

Lumea animală este extrem de variată, cu grade de complexitate diferite, cu structuri chimice diferite ale țesuturilor lor, cu modul și mediul de viață de asemenea extrem de variate. Aceste particularități se reflectă în activitatea specifică globală a fiecărui organism animal, dar și în cea a fiecărui organ sau țesut în parte.

Animalele marine

În cazul organismelor animale care populează apele marine, se disting două mari grupe: organismele care populează volumul de apă marină propriu-zis (pelagice) și organismele care populează fundul apei.

În grupa organismelor pelagice se disting două subgrupe:

- planctonul - format din organisme mici care nu au organe pentru deplasare în mediu și care se deplasează odată cu curenții acvatici;
- nectonul - format din organisme care au sistem de deplasare propriu în apă (pești, mamifere, etc.)

La plancton, asimilarea izotopilor radioactivi și a altor elemente se face prin suprafața (țesutul) aflată în contact direct cu apa marină. La celelalte categorii, izotopii radioactivi pătrund în organism și prin ingerarea apei și hranei (vegetale sau animale) și prin suprafața de contact cu apa sau cu fundul apei.

Planctonul și celelalte animale marine au radioactivitatea β datorată ^{40}K . Activitatea specifică datorată lui are valori diferite de la o specie la alta și chiar de la un individ la altul în cadrul aceleiași specii (în funcție de vârsta și condițiile concrete de viață: temperatura apei, anotimp, etc.). Diferitele țesuturi ale unui organism animal diferă, de asemenea, prin conținutul lor în izotopul radioactiv ^{40}K .

La peștii marini au fost măsurate activități specifice medii de ordinul $\Lambda_s(^{40}\text{K}) \sim 4 \div 40$ Bq/kg, cu valori mai mici pentru sânge și alte lichide din țesuturi care au $\Lambda_s(^{40}\text{K}) \sim (5,5 \div 18,5)$ Bq/l decât pentru țesuturile musculare $\Lambda_s(^{40}\text{K}) \sim (55 \div 185)$ Bq/l, în condițiile în care apa marină are $\Lambda_s(^{40}\text{K}) = 10$ Bq/l.

În general, s-a observat o acumulare preferențială pentru ^{40}K în țesuturile musculare și ale altor animale (la mamiferele marine $\Lambda_s(^{40}\text{K}) \sim 80 \div 220$ Bq/kg în mușchi). De asemenea, s-a observat că activitatea specifică generată de ^{40}K în țesuturile musculare ale masculilor este mai mare (aproape dublă) decât la femele și e corelată cu o activitate musculară mai intensă care favorizează acumularea de potasiu în organism.

Contribuția izotopului radioactiv natural ^{87}Rb la radioactivitatea β a animalelor marine este cu 1 ÷ 2 ordine de mărime mai mică.

Radioactivitatea α a planctonului, indiferent de specie și de zona în care trăiește, este în esență generată de izotopul radioactiv natural ^{226}Ra și e caracterizată de o activitate specifică $\Lambda_s(^{226}\text{Ra}) \sim 0,16 \text{ Bq/kg}$ de masă vie, ceea ce înseamnă că planctonul are un factor de concentrare pentru ^{226}Ra egal cu zece față de apa marină din larg. Celelalte tipuri de animale marine, fie că trăiesc pe fundul apei, fie că populează volumul de apă marină, au un nivel de radioactivitate α a țesuturilor generată de ^{226}Ra de același ordin de mărime cu al planctonului.

Aportul celorlalți izotopi radioactivi naturali α - radioactivi reprezintă o fracțiune din cel al ^{226}Ra . Dintre aceștia, uraniul urmează după radiu în ceea ce privește contribuția la radioactivitatea α , în timp ce thoriul este practic absent în țesuturile organismelor animale marine.

Astfel, peștii conțin $\sim 10^{-5}$ grame de uraniu pe kg de țesut viu, adică $\sim 0,12 \text{ Bq/kg}$, cu variații de la o specie la alta și chiar de la un exemplar la altul, uneori putând depăși conținutul lor în ^{226}Ra .

Animalele terestre

Studiul radioactivității β a diferitelor organisme vii terestre (insecte, păsări, mamifere) a pus în evidență o serie de regularități, observate, de altfel, și la animalele marine. Astfel:

- ☐ Izotopul radioactiv ^{40}K dă principala contribuție la radioactivitatea β ;
- ☐ Acumularea de ^{40}K se face mai activ în perioada și la indivizii cu activitate musculară intensă (la tineri, la masculi);
- ☐ Conținutul de ^{40}K în lichidele din organism este mai mic decât în țesuturile musculare;
- ☐ La sânge, conținutul de ^{40}K este mult mai mare în eritrocite decât în ser;
- ☐ Organismele bătrâne au activitatea specifică medie generată de ^{40}K mai mică decât organismele tinere;
- ☐ Concentrația de ^{40}K în sângele mamiferelor depinde de perioada fiziologică a animalului: perioada de gestație, perioada de alăptare a puilor sau perioada de după alăptare;
- ☐ Concentrația de substanțe minerale (deci și de ^{40}K) în lichidele organismului depinde direct de starea fiziologică și de activitatea sistemului nervos central;
- ☐ Principala deosebire în activitatea specifică $\Lambda_s(^{40}\text{K})$ a sângelui diferitelor specii este cauzată de conținutul diferit de potasiu în globulele roșii ale speciilor respective; eritrocitele din sângele cailor, porcilor, iepurilor au o radioactivitate mult mai mare decât eritrocitele din sângele celorlalte mamifere;
- ☐ Radioactivitatea organelor interne, ca și a țesuturilor musculare, suferă variații individuale în funcție de conținutul hranei și de condițiile de viață.

Ordinul de mărime al radioactivității β medii generată de ^{40}K în țesuturile musculare ale animalelor terestre este $u = 40 \text{ Bq/kg}$: păsări domestice [găina 3,1 u; curcanul 2,7 u; rața 3 u], păsări sălbatice [fazanul 3,5 u; rața sălbatică 2,7 u; pescărușul 6,8 u], animale domestice [vaca 2,1 u; calul 3,8 u; oaia 1,9 u; iepurele de casă 3,1 u].

Activitatea specifică măsurată pentru diferite organe, la cornute mari, arată diferențe mari, ordinul de mărime fiind de asemenea $u = 40 \text{ Bq/kg}$: globul ocular 1 u; sângele 1,2 u; limba și rinichii 1,5 u; ficatul 1,9 u; inima și plămânii 2 u; pielea 2,1 u; creierul 2,19 u.

Variația conținutului de potasiu (deci și de ^{40}K) în lichidele din organism în funcție de stările funcționale ale organismului a fost studiată supunând un animal de experiență (câine)

unor condiții foarte diferite, cum ar fi: stare de insomnie, stare de înfometare, stare de asfixie, stare de narcoză, încălzire, răcire, iradiere cu raze X, etc. S-au observat variații ale conținutului de potasiu în plasma sângelui și în lichidul cefalorahidian, de la 50 % până la peste 150 % față de valoarea normală.

În ceea ce privește radioactivitatea α , ca și în cazul animalelor marine, ea este generată în special de ^{226}Ra și de ^{238}U , care dau o activitate specifică medie a țesuturilor de ordinul $\Lambda_{s\alpha} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/kg}$, cu variații în funcție de tipul țesutului.

11.4. RADIOACTIVITATEA NATURALĂ A CORPULUI OMENESC

Sursa radioactivității țesuturilor din corpul omului este mediul înconjurător. Prin hrană, apă, aer, are loc un schimb continuu de substanțe cu mediul, de la care primește și izotopi radioactivi. Aceștia nu se acumulează integral în corp, pentru că în caz contrar radioactivitatea corpului uman ar crește continuu; o parte din ei sunt, de asemenea, eliminați continuu, astfel încât nivelul de radioactivitate al omului, ca și al altor mamifere, se menține la un nivel determinat, cu oscilații (fluctuații) în jurul unei valori medii. La organismele mature, care primesc zilnic aceeași cantitate de hrană, se realizează de fapt un echilibru: cantitatea de izotopi radioactivi naturali care intră în corp este comparabilă cu cea a izotopilor radioactivi naturali eliminați prin excreție.

Nivelul de radioactivitate naturală a unui om standard (greutatea 70 kg) depinde de tipul de hrană, de zona geografică și de particularitățile geochimice ale regiunii în care trăiește.

În tabelul 11.3. se dau câteva cifre orientative privind conținutul de izotopi radioactivi naturali într-un om standard (70 kg) și contribuția lor la radioactivitatea corpului uman.

La izotopii radioactivi notați cu asterix (U^* și Th^*), la activitatea globală contribuie și descendenții acestora, cu o cantitate Λ_{desc} de zece ori mai mare decât a izotopului radioactiv părinte ($\Lambda_{\text{desc}} = 10 \Lambda_{\text{IR p\ddot{a}r}}$).

Cea mai mare contribuție la radioactivitatea β naturală a corpului uman o are ^{40}K , iar radioactivitatea α este esențial datorată U, Th și descendenților lor.

Scăderea cantității de izotopi radioactivi naturali din corpul uman datorită dezintegrării radioactive este nesemnificativă la principalii izotopi radioactivi naturali, deoarece au o perioadă de înjumătățire foarte mare (T_{f}). În schimb, procesele biologice au un rol activ în eliminarea acestora din țesuturi. Ritmul de eliminare este caracterizat prin perioada de înjumătățire biologică T_{b} . Pentru definirea și determinarea perioadei biologice, se administrează o cantitate bine determinată din izotopul radioactiv natural studiat odată cu hrana de la o singură masă. După ingestia acestuia, se măsoară radioactivitatea organului critic dar și a urinei (uscată) sau a fecalelor (transformate în cenușă) colectate la diferite intervale de timp după ingestie. În ambele cazuri s-a observat o scădere aproape exponențială a radioactivității probelor, cu o perioadă de înjumătățire efectivă (timp efectiv) măsurată:

$$T_{\text{ef}} = \frac{\ln 2}{\lambda_{\text{ef}}}$$
 . Această perioadă de înjumătățire efectivă este rezultatul dezintegrării radioactive a izotopului radioactiv natural și al metabolizării lui de către sistemul biologic respectiv. Deoarece probabilitatea totală efectivă λ_{ef} de dispariție a izotopului radioactiv

natural în unitatea de timp este dată de suma probabilităților de dezintegrare $\lambda_f = \frac{\ln 2}{T_f}$ și de eliminare biologică $\lambda_b = \frac{\ln 2}{T_b}$, rezultă că:

$$\frac{1}{T_{ef}} = \frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_b} \tag{11.4.1}$$

Deoarece T_{ef} și T_f se cunosc, se poate determina T_b .

Tabelul 11.3: Conținutul de izotopi radioactivi naturali într-un om standard (70 kg) și contribuția lor la radioactivitatea corpului uman (ref. [4])

Izotopul radioactiv	Cantitatea totală (g/corp (70 kg))	Λ (Bq)
⁴⁰ K	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^3$
¹⁴ C	$2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^3$
⁸⁷ Rb	$7 \cdot 10^{-3}$	17,0
²³⁸ U*	$7 \cdot 10^{-4}$	8,9
³ H	$8 \cdot 10^{-13}$	2,6
²³⁵ U*	$5 \cdot 10^{-6}$	0,4
²³² Th*	$7 \cdot 10^{-5}$	0,3

În tabelul 11.4 sunt date perioadele biologice de înjumătățire pentru principalii izotopi radioactivi naturali și radioactivitatea diferitelor organe datorată lor.

În condiții normale de hrană, în care se introduce zilnic practic aceeași cantitate de izotopi radioactivi naturali, radioactivitatea corpului unui om se stabilizează la o valoare de echilibru.

Dacă modul de hrană se schimbă la un moment dat și cantitatea de izotopi radioactivi naturali introdusă zilnic în corp crește sau scade, radioactivitatea corpului crește sau scade, iar după un timp $t = 5 \cdot T_{ef}$ se stabilizează la o nouă valoare de echilibru, mai ridicată sau mai scăzută decât în cazul normal.

Eliminarea naturală a radionuclizilor din organism se face pe diferite căi: renală (urina), digestivă (fecale, salivă), pulmonară (aer expirat, secreții nazale) și tegumentară (transpirație). În drumul lor pe una dintre aceste căi, izotopii radioactivi naturali vor iradia toate secțiunile care formează tractul respectiv, cu radiații α și β specifice. Organele și țesuturile care nu fac parte din tractul respectiv vor fi iradiate, pe de o parte de razele γ ale izotopilor radioactivi naturali reținuți în tract, iar pe de altă parte de razele α , β , γ ale izotopilor radioactivi naturali care au trecut în fluidele corpului.

Tabelul 11.4: Perioadele de înjumătățire biologice ale izotopilor radioactivi naturali (ref.[11,12])

Izotopul radioactiv natural	Organul critic	T_b (zile)
^3H	Tot corpul	12
^{14}C	Grăsime	12
^{40}K	Tot corpul	58
^{40}K	Muschi	58
^{87}Rb	Ficat, pancreas	$60 \div 63$
^{87}Rb	Tot corpul	45
^{226}Ra	Oase	$1,6 \cdot 10^4$
^{210}Pb	Tot corpul	$4,01 \cdot 10^2$
^{210}Pb	Rinichi, plămâni, tract gastrointestinal	$1,2 \cdot 10^3$
^{232}Th	Tot corpul	$5,7 \cdot 10^4$
^{232}Th	Oase	$7,3 \cdot 10^4$
$^{235,238}\text{U}$	Rinichi	15
$^{235,238}\text{U}$	Tot corpul	100
$^{235,238}\text{U}$	Oase	300
^{210}Po	Rinichi, splină, plămâni, tract gastrointestinal	$42 \div 46$

Evaluarea activității diferitelor compartimente (organe) ale unui tract generată de un anumit izotop radioactiv natural se face pe baza unui model biologic, care permite stabilirea unor relații matematice între activitățile diferitelor compartimente pe de o parte, și activitatea - sursă a tractului și activitatea eliminată din tract pe de altă parte, ultimile două fiind cunoscute experimental.

Modelul biologic împreună cu relațiile matematice ce caracterizează un tract stau la baza așa-numitelor modele dozimetrice, pe baza cărora se calculează expunerea (dozele de iradiere) diferitelor organe în cazul contaminărilor radioactive.

În tabelele 11.5 și 11.6 sunt date activitățile specifice α generate de uraniu și de radium în diferite organe și țesuturi ale corpului omenesc, iar în tabelul 11.7 sunt date activitățile specifice β generate de ^{40}K în diferite țesuturi.

Tabelul 11.5: Activitatea specifică α generată de uraniu natural în diferite țesuturi și organe (ref.[4])

Organul (țesutul)	Λ_s (Bq /kg)
Ovare	8,1
Ficat	1,2
Rinichi	0,35
Creier	$8 \cdot 10^{-3}$
Mușchi	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Sânge	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Tabelul 11.6: Activitatea specifică α generată de radii naturali în diferite țesuturi și organe (ref.[4])

Organul (țesutul)	Λ_s (Bq /kg)
Os	0,26
Plămân	$7,4 \cdot 10^{-2}$
Ficat	0,11
Mușchi	$5,4 \cdot 10^{-2}$
Intestin subțire	$2,6 \cdot 10^{-2}$
Intestin gros	$2,2 \cdot 10^{-2}$

Tabelul 11.7: Activitatea specifică β generată de ^{40}K în diferite țesuturi (ref[4])

Organ, țesut, lichid	Λ_s (Bq /kg)
Creier	89
Mușchi	104
Inimă	63
Plămân	67
Ficat	67
Sânge (total)	56
Sânge (eritrocite)	$93 \div 130$
Rinichi	59
Os	26
Dinți	19
Piele	48
Grăsime	19
Limfă	67
Suc gastric	$166 \div 204$
Lapte	15
Transpirație	$7 \div 37$
Urină	$59 \div 96$

11.5. METABOLIZAREA ȘI TRANSFERUL IRN

11.5.1. FACTORI DE CONCENTRARE ȘI TRANSFER

Elementele chimice din compoziția substanței vii se află într-un proces ciclic de migrație din mediul abiotic în organisme vii, și din organisme vii în mediul mineral, abiotic. Acest proces ciclic include transferul radionuclizilor naturali din mediul mineral la diferite organisme vii prin așa-numitele „lanțuri trofice”, precum și prin metabolizarea acestora.

Este cunoscut faptul că, în afara elementelor esențiale de structură (carbon, oxigen, azot, hidrogen), orice organism viu are nevoie pentru funcționarea lui și de alte elemente chimice, pe care și le acumulează selectiv din mediu. Prin această capacitate de concentrare selectivă a unor elemente chimice, biosfera joacă un rol important în dinamica chimică a scoarței terestre, în sensul unui factor de control.

Izotopii radioactivi naturali sau artificiali ajunși în zona biosferei intră în circuitele biogeochimice în cazul organismelor vegetale și animale de viață scurtă sau sunt stocați pentru perioade de timp mai mici sau mai mari în fosile vegetale sau animale (trunchiuri de copac, sedimente, etc.).

Migrația izotopilor radioactivi naturali prin circuitele biogeochimice depinde de posibilitatea de metabolizare, de sinergismul și antagonismul elementelor chimice, precum și de proprietățile mediului acvatic sau terestru.

Sub acțiunea factorilor fizici, chimici sau biologici, izotopii radioactivi naturali sau artificiali aflați în aer, apă sau sol, pot fi concentrați în organisme, în sol ori în sedimente (în cazul mediului acvatic) sau pot fi diluați și dispersați în mediile respective.

Pentru a caracteriza aceste efecte de concentrare sau diluare s-au introdus două mărimi specifice:

☐ *Factorul de concentrare (FC)*

Pentru organismele acvatice, FC este definit ca raportul dintre activitatea specifică a organismelor în stare proaspătă și activitatea specifică a apei (după îndepărtarea impurităților).

Pentru organismele acvatice moarte, care se depun pe fundul apei formând sedimente, FC se definește ca fiind raportul dintre activitatea specifică a sedimentelor și activitatea specifică a apei purificate (filtrate).

Pentru plantele din ecosistemele terestre, FC se definește ca fiind raportul dintre activitatea specifică a plantei și activitatea specifică a solului pe care crește aceasta.

☐ *Factorul de transfer (FT)*

Factorul de transfer caracterizează transferul izotopilor radioactivi dintr-o verigă a lanțului trofic în alta. Se definește ca fiind raportul dintre activitatea specifică a organismelor dintr-un nivel trofic și activitatea specifică a organismelor din nivelul trofic precedent (consumatori primari față de producători primari, consumatori secundari față de consumatori primari, etc.).

11.5.2. METABOLIZAREA ȘI RADIOTOXICITATEA IRN

Odată pătrunși în organismele vii, izotopii radioactivi naturali și cei artificiali se comportă diferit, în funcție de proprietățile lor fizico-chimice. Astfel, se întâlnesc următoarele situații:

- ☐ Metabolizare aproape identică cu elementele chimice cărora le aparțin, așa cum este cazul izotopilor radioactivi naturali: ^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^{40}K , ^{44}Ca , etc.
- ☐ Metabolizare asemănătoare cu cea a elementelor esențiale pentru organism și care au aceleași proprietăți chimice, cum este cazul izotopilor: $^{87}\text{Rb-K}$, $^{226}\text{Ra-Ca}$, etc.
- ☐ Metabolizare redusă, nespecifică, urmată de regulă de eliminarea rapidă din organismele vii, cum este cazul izotopilor radioactivi naturali: ^{210}Po , ^{212}Th , ^{215}U , ^{218}U , etc.

Astfel, izotopii radioactivi ajunși în organism se pot distribui în întregul organism (cazul ^3H , ^{14}C , etc.) sau se pot concentra în anumite organe, devenind mici surse de radiații nucleare cu efecte nocive asupra substanței vii.

Radionuclizii pătrunși în organismul uman au fost clasificați astfel:

■ Transferabili și care difuzează în organism, deoarece sunt solubili în condițiile fizico-chimice din mediul biologic: ^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , etc.

■ Netransferabili, din care fac parte izotopi radioactivi în combinații chimice insolubile la orice pH, care nu difuzează în organism și care au drept „poartă de intrare” (drept organ critic) ficatul, sau care difuzează foarte puțin; în această categorie se încadrează izotopii radioactivi: Pu (sub formă de PuO_2) și Am, Cm, Cf.

■ Uraniul constituie un caz particular căci, în forme chimice diferite se comportă diferit. În mediul biologic, uraniul trece rapid în uranil (UO_2^{2+}) care se comportă ca și calciul. O altă posibilitate pentru uraniu este să precipite la nivelul tubilor renali. Astfel, uraniul are ca organ critic fie sistemul osos, fie rinichiul.

Căile de pătrundere a izotopilor radioactivi naturali în organismul uman sunt:

- Calea respiratorie - prin inhalarea de aerosoli radioactivi din atmosferă;
- Calea digestivă - prin ingestia de apă și alimente contaminate cu izotopi radioactivi naturali sau prin înghițirea sputei (contaminată în căile respiratorii prin inhalare);
- Calea cutanată.

Comportarea izotopilor radioactivi pătrunși în căile respiratorii prin inhalare depinde de:

- dimensiunile particulelor pe care sunt fixați izotopii;
- zona de depunere (nazofaringiană, traheopulmonară, pulmonară);
- perioada de înjumătățire biologică (timpul de metabolizare - poate fi de ordinul zilelor, săptămânilor sau anilor).

Astfel, granulele cu diametrul $\phi > 10 \mu\text{m}$ sunt reținute în nazofaringe în proporție de 85 %, iar din cele cu $\phi \sim 0,2 \mu\text{m}$ sunt reținute în plămâni cca 50 %, vor fi exhalate odată cu aerul respirat - 35 % și amestecate cu sputa - 15 %.

Granulele de diverse dimensiuni depuse în căile respiratorii sunt deplasate până la nivelul faringelui ($v \sim 15 \text{ mm /minut}$), de unde sunt înghițite sau expectorate. Astfel, o contaminare prin inhalare se poate transforma în contaminare prin ingestie.

Granulele insolubile sfârșesc prin a se localiza în pereții alveolelor pulmonare și în țesutul pulmonar, în timp ce granulele ce se dizolvă rapid trec în sânge.

În contaminarea internă pe cale digestivă, o parte din izotopii radioactivi sunt absorbiți și fixați în organe, iar restul sunt eliminați prin urină și fecale. Radionuclizii insolubili sau puțin solubili rămân în intestin o perioadă de timp corespunzătoare tranzitului, după care sunt eliminați prin fecale. Izotopii radioactivi solubili sunt absorbiți prin membrana intestinală și, odată cu sângele, ajung la diverse organe și țesuturi care-i rețin, sau sunt eliminați prin urină. Astfel, la nivelul tubului digestiv au loc procese de depunere, absorbție și desorbție metabolică, iar izotopii radioactivi pot staționa până la șase ore în stomac și până la 22 ore în intestinul gros inferior. Doza de iradiere va crește, deci, cu timpul de staționare a izotopilor radioactivi în tubul digestiv.

Contaminarea pe cale cutanată este mai puțin semnificativă decât contaminarea prin inhalare sau cea prin ingestie

Radiotoxicitatea unui radionuclid pătruns în organismul uman depinde de solubilitatea compusului chimic care include izotopul radioactiv, de natura radiațiilor emise (radiațiile α dau o radiotoxicitate mult mai mare decât radiațiile β sau γ) și de timpul de înjumătățire efectiv T_{ef} .

În tabelul 11.8 sunt reunite câteva dintre proprietățile fizice și biologice ale principalilor izotopi radioactivi naturali.

Calca principală de contaminare a omului este cea respiratorie, unde fracțiunea ajunsă în organele critice este cuprinsă între 25 și 40% pentru majoritatea izotopilor radioactivi naturali și la care se adaugă metabolizarea relativ redusă (T_b foarte mare) a radionuclizilor deja fixați în organe (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th și ^{238}U).

11.5.3. LANȚURI TROFICE

Transferul izotopilor radioactivi de la sursa minerală (abiotică) la un organism viu se face, de regulă, în mai multe etape.

În prima etapă are loc transferul izotopilor radioactivi de la sursa abiotică la un organism viu.

În etapele următoare are loc transferul de izotopi radioactivi de la un organism inferior (producător primar) la un organism superior (consumator primar) căruia îi servește drept hrană, urmată apoi de alte etape, în care organisme inferioare servesc drept hrană organismelor superioare și transferându-le izotopii radioactivi pe care i-au acumulat.

Aceste lanțuri alimentare, numite lanțuri trofice, care asigură echilibrul biologic în ecosisteme sunt foarte diferite: mai lungi sau mai scurte, mai simple sau mai complexe, în funcție de complexitatea organismului și a ecosistemului în care acesta trăiește.

Un organism mai complex (care este, de exemplu, omnivor), se poate hrăni prin lanțuri trofice diferite și poate primi izotopi radioactivi prin fiecare din aceste lanțuri, dar în cantități diferite.

Pentru o evaluare corectă a accesului unui izotop radioactiv într-un organism, trebuie analizate toate aceste lanțuri cu verigile lor, și transferul de la o verigă la alta a fiecărui izotop radioactiv de interes pentru organismul dat.

Radionuclizii ajung în organismele vii din mediul abiotic prin suprafețele cu care vin în contact direct sau odată cu apa și hrana. Astfel, absorbția prin suprafața biologică se poate face prin membrana celulelor algale, suprafața rădăcinii, a tulpinii, a frunzelor, a florilor și a fructelor unei plante, prin branhii la pești și insecte, prin plămâni la reptile, păsări și animale, sau prin tegumente la unele organisme animale.

Prin ingestia de hrană și apă cu conținut de izotopi radioactivi are loc accesul acestora în organisme animale și în plante carnivore.

În ecosistemele acvatice, naturale sau artificiale (piscicultura), organismele vegetale submerse preiau direct izotopii radioactivi, în timp ce organismele animale primesc izotopi radioactivi prin respirație și ingestie și mai puțin prin tegument.

Organismele animale și vegetale care nu au fost folosite ca hrană de alte organisme, după moarte cedează izotopii radioactivi care reintră în circuitul materiei în urma procesului de descompunere.

O mică parte din izotopii radioactivi părăsesc mediul acvatic atunci când organismele acvatice servesc drept hrană pentru organismele terestre (alge, pești, crustacee preluate de om sau de insecte și păsări).

Exemple de lanțuri trofice simple care implică organisme acvatice sunt redată în figura 11.1(a și b)

În ecosistemele terestre naturale sau artificiale (agroecosisteme) izotopii radioactivi sunt preluați de plante din aerosoli sau din praful fin ridicat de pe sol de către vânt prin frunze, flori, tulpini și chiar fructe. Prin rădăcini, ele primesc izotopii radioactivi solubili din sol, în special cei necesari creșterii plantei.

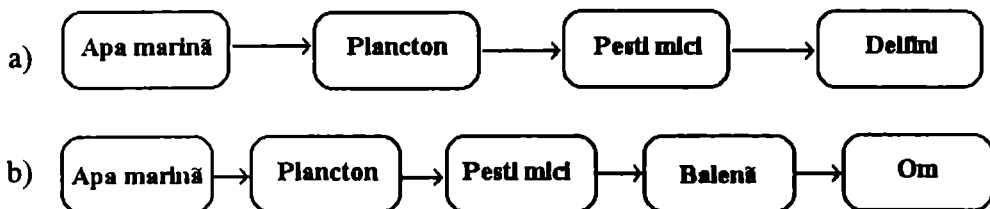


Figura 11.1: Lanțuri trofice simple care implică organisme acvatice

Ierbivorele (bovine, ovine), când pasc iarbă, introduc în organismul lor și fragmente de sol cu izotopii radioactivi pe care-i conține acesta. Ele sunt apreciate ca principala verigă în transferul izotopilor radioactivi de la plante la om.

Un lanț trofic simplu și unul cu ramificație (complex) în care sunt implicate organisme terestre sunt date în figura 11.2. (a și b)

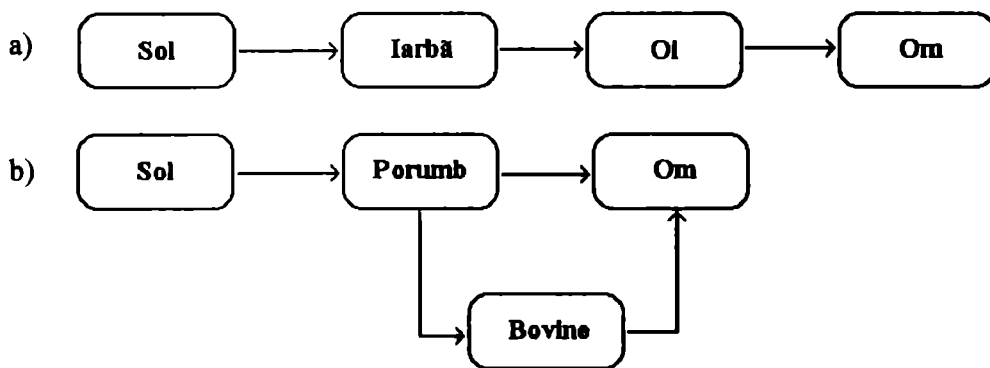


Figura 11.2: Lanț trofic simplu și lanț cu ramificație în care sunt implicate organisme terestre

Dacă dorim să analizăm toate căile prin care izotopii radioactivi pot ajunge din mediul acvatic la om sau de la sol la om, situația se complică mult, datorită strânsei și diversificatei relații dintre mediul înconjurător și biosferă între care au loc, permanent, schimburi de substanță și de energie.

De aceea, pentru rezolvarea problemei, se recurge la simplificarea sau detalierea situației folosindu-se modelul compartimental. Un compartiment reprezintă un spațiu omogen dintr-un ecosistem. Astfel, vegetația poate fi considerată un compartiment, animalele un alt compartiment, aerul, solul și mediul acvatic alte compartimente.

Astfel, în modelul compartimental schema transferului radionuclizilor către om într-un ecosistem terestru poate fi reprezentată ca în figura 11.3 (în cazurile concrete se fac anumite detalieri sau simplificări ale schemei).

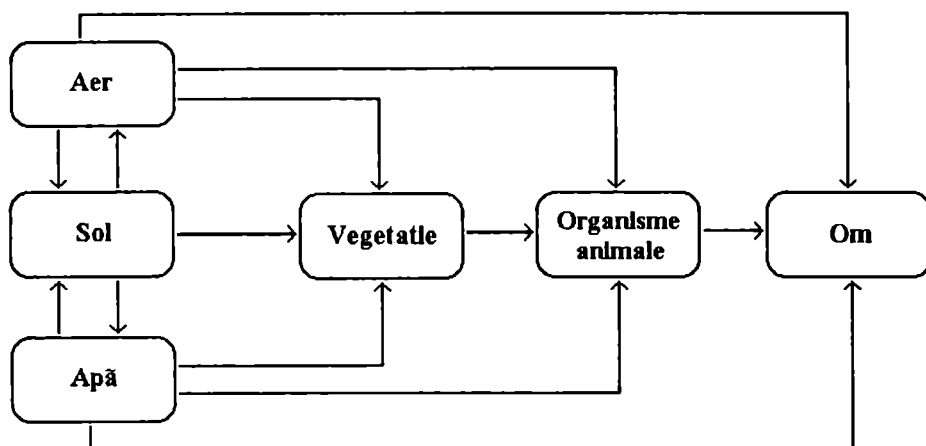


Figura 11.3: Schema transferului radionuclizilor către om într-un ecosistem terestru

11.6. CIRCUITUL IRN ÎN BIOSFERĂ

Biosfera planetei Pământ a fost, este, și va fi în continuare teatrul unor transformări continue, generate de dinamica scoarței terestre (cutremure, erupții vulcanice), a hidrosferei (fenomene hidrologice) și a atmosferei (fenomene meteorologice).

Asemenea fenomene au ca efect, printre altele, eliberarea izotopilor radioactivi naturali din rocile de munte sub formă de praf, substanțe dizolvate, gaze emanate, etc. Mai departe, acești izotopi radioactivi naturali ajung în bazinele acvifere, în straturile joase ale atmosferei, participă la formarea solurilor și ajung în organismele vii (plante, animale, om).

Soarta izotopilor radioactivi naturali ajunși în oricare componentă a mediului poate fi diferită. De exemplu, izotopii radioactivi naturali ajunși în mediile acvatice pot fi:

- ☐ consumați de organismele vii care populează mediul acvatic;
- ☐ ridicați în atmosferă sub formă de stropi;
- ☐ rămân în apă, sub formă de substanță dizolvată sau suspensie;
- ☐ se depun sub formă de sedimente pe fundul apei.

În general, ei pot participa în continuare la circuitul izotopilor radioactivi naturali în biosferă, cu excepția celor care formează sedimentele. Dar, prin erupții vulcanice, fundul mărilor se poate ridica, generând formațiuni muntoase de origine sedimentară și devenind astfel sursă primară, terestră, de izotopi radioactivi naturali.

Izotopii radioactivi naturali ajunși în atmosferă pot reveni pe pământ, fie prin precipitații (căderi umede), fie prin depuneri uscate (praf), ajungând pe sol sau în bazine acvifere. Izotopii radioactivi naturali din sol pot fi ridicați în atmosferă, antrenati de ape sau consumați de organismele vii.

Rezultat al unor astfel de dinamici, la care se adaugă și circuitul izotopilor radioactivi naturali prin lanțuri trofice între organismele vii, s-a ajuns la stabilirea unei stări de echilibru: concentrațiile de izotopi radioactivi naturali în atmosferă, în hidrosferă și în sol rămân

aproximativ constante, deși are loc un transport continuu de izotopi radioactivi naturali din rocile magmatice în aceste medii. În această stare de echilibru, cantitatea de izotopi radioactivi naturali care intră în circuitul din biosferă este practic egală cu cantitatea de izotopi radioactivi naturali care iese din acest circuit prin depuneri sedimentare. La rândul lor, aceste sedimente vor constitui cândva, ca urmare a unor fenomene tectonice, noi surse primare de izotopi radioactivi naturali, așa cum nu de puține ori s-a întâmplat în istoria planetei noastre.

Aceste transformări au loc însă pe fundalul unei continue scăderi a cantității globale de izotopi radioactivi naturali datorită procesului ireversibil de dezintegrare radioactivă, atât a izotopilor radioactivi naturali aflați în circuitul din biosferă, cât și a celor aflați în rezervorul natural de izotopi radioactivi naturali - rocile de munte. În diferite epoci istorice, stările de echilibru au diverse nivele de radioactivitate medie a atmosferei, hidrosferei, solului, vegetației, animalelor, omului.

Pentru actuala stare de echilibru diferiți autori au estimat nivelurile de radioactivitate pentru diferitele componente ale mediului, generate de radium și radon, reunite în tabelul 11.9.

Tabelul 11.9: Radioactivitatea medie generată de radium și radon în diferite componente ale mediului (ref[4])

Substratul	Λ_s (Ci/kg)
Roci acide	10^{-9}
Roci bazice	10^{-10}
Roci sedimentare	10^{-9}
Sol	$10^{-9} \div 10^{-10}$
Apă marină [*]	$10^{-12} \div 10^{-13}$
Apă de râu [*]	$10^{-12} \div 10^{-14}$
Aer din sol [*]	10^{-10}
Aer atmosferic lângă sol [*]	10^{-13}
Aer atmosferic la suprafața oceanului [*]	10^{-15}
Plante	10^{-12}
Animale	10^{-13}

^{*} în Ci/l

CAPITOLUL 12

REDISTRIBUIREA IRN ÎN MEDIU ȘI CREȘTEREA EXPUNERII LA RADIATII DATORITĂ ACTIVITĂȚILOR TEHNOLOGICE ȘI GOSPODĂREȘTI ALE OMULUI

12.1. PRINCIPALELE CĂI DE REDISTRIBUIRE A IZOTOPILOR RADIOACTIVI NATURALI ÎN MEDIU

Prin diversele sale activități, gospodărești sau tehnologice, omul contribuie la redistribuirea izotopilor radioactivi naturali în mediu și, deci, la modificarea radioactivității naturale a mediului și a expunerii la radiații a populației aflate în zona unor astfel de activități.

Principalele căi de redistribuire a izotopilor radioactivi naturali de către om sunt:

❑ *Exploatările miniere (de cărbune, uraniu sau orice alt tip), exploatările petroliere și de gaze naturale*

Prin astfel de activități tehnologice, izotopii radioactivi naturali aflați în adâncul pământului sunt aduși la suprafața acestuia. Aici, ei pot intra în circuitul elementelor chimice din biosferă sau pot staționa, sub formă de depozite de materiale, ridicând nivelul de radioactivitate din zonă peste cel normal.

❑ *Producerea de energie electrică în centrale electrice pe bază de combustibil fosil (cărbune, petrol, gaz) sau turbă*

Toate tipurile de combustibili conțin izotopi radioactivi naturali în concentrații naturale. Prin arderea combustibilului în centrală are loc o concentrare a izotopilor radioactivi naturali în produsele de ardere care scapă în atmosferă (gaz, fum), difuzează sub acțiunea curenților atmosferici sau se depun pe solul, apele și vegetația aflate în zona vecină centralei.

❑ *Producerea de energie electrică în centralele nucleare*

Accasta presupune exploatarea minieră a zăcămintelor uranifere. Rocile bogate în uraniu și în descendenții săi radioactivi sunt supuse unui proces tehnologic specific, până la obținerea combustibilului nuclear propriu-zis. În fiecare etapă a procesului poate avea loc o redistribuire a izotopilor radioactivi naturali prin aducerea la suprafață a rocilor uranifere, prin depozitarea în diverse locuri a materialului radioactiv, prin transportul dintr-un loc în altul după nevoile tehnologice sau prin efluenții gazoși sau lichizi deversați (controlat sau nu!) în mediu în timpul procesului de prelucrare. La acestea se adaugă împrăștierea necontrolată a izotopilor radioactivi naturali din combustibilul nuclear în caz de accident nuclear.

□ *Combinatele de îngrășămintे fosfatice*

Combinatele folosesc drept materie primă roci fosfatice care conțin, inevitabil, pe lângă fosforul necesar, și izotopi radioactivi naturali. În procesul tehnologic, izotopii radioactivi naturali sunt concentrați în produse și subproduse sau în deșeuri. Producerea, utilizarea și depozitarea acestora au un impact important asupra radioactivității mediului prin concentrarea și redistribuirea izotopilor radioactivi naturali. În toate aceste cazuri, crește expunerea la radiații în primul rând a personalului care lucrează în aceste domenii, dar și a populației care pur și simplu locuiește sau lucrează în zona vecină acestor surse de poluare industrială. În general, orice tip de poluare industrială are, în ultimă instanță, și o componentă radioactivă care nu trebuie neglijată, ci trebuie ținută sub control.

□ *Activități gospodărești*

Activitățile în care omul utilizează pentru încălzirea locuințelor combustibili (cărbone, gaz, petrol, turbă) sau ape geotermale, sau în care utilizează apa în gospodărie la prepararea hranei, la baie (duș), sunt tot atâtea căi de redistribuire a IRN și de concentrare a acestora. Astfel, fumul și gazele evacuate prin coșul caselor sau al centralelor termice destinate încălzirii locuințelor conțin IRN care, ajungând în atmosferă, intră în circuitul elementelor din biosferă. Apa dispersată fin la dușuri emană radon, măbind concentrația acestuia în atmosfera din baieși, implicit, în încăperile cu care comunică. Gazele arse în bucătărie pentru prepararea hranei contribuie, de asemenea, la creșterea fondului de radiații peste valoarea normală. Construcția de locuințe din materiale care, de regulă, conțin izotopi radioactivi naturali (U, Th), favorizează acumularea de IRN în camerele de locuit datorită radonului care este emanat din pereți. Omul își petrece o mare parte din timp în aceste încăperi cu fond de radiații mai mare decât cel natural, din spațiul liber.

12.2. CENTRALE TERMOELECTRICE. CICLUL COMBUSTIBILILOR FOSILI

Orice centrală termoelectrică, indiferent de tipul ei, presupune arderea unui combustibil, încălzirea apei dintr-un circuit și folosirea forței motrice a aburilor produși pentru a pune în mișcare o turbină generatoare, ca în schema din fig. 12.1.

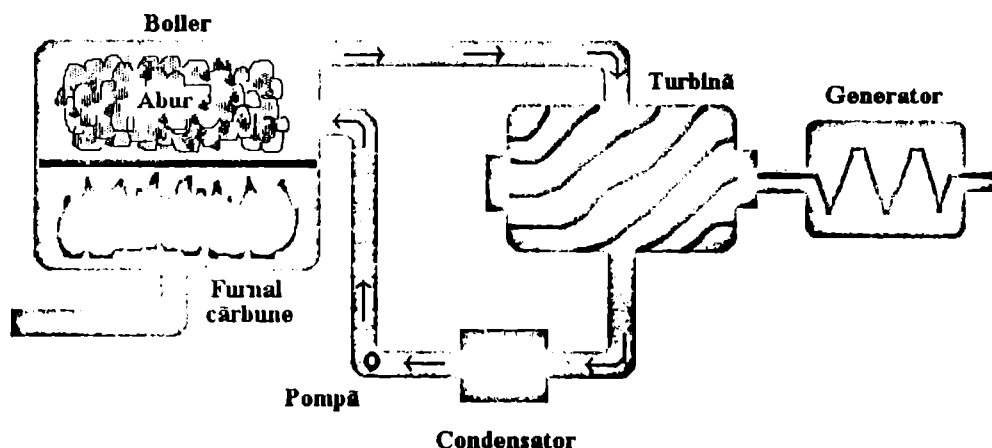


Figura 12.1: Schema unei centrale termoelectrice

Combustibilii folosiți pe scară mai largă sunt combustibilii fosili: cărbune, țiței și gaze naturale. În lumea industrializată, centralele termoelectrice pe bază de cărbune (CTEC) sunt cele mai utilizate pentru producerea energiei electrice.

Din momentul extracției, combustibilul fosil suferă o serie de manipulări și transformări care, în ansamblul lor, formează ciclul combustibilului fosil (CCF).

Ciclul combustibilului de la orice centrală termoelectrică începe cu exploatarea materiei prime și parcurge o serie de faze de prelucrare, ardere, utilizare și depozitare a produșilor de ardere, etc.

În fig. 12.2 este dată schema-bloc a acestor faze pentru combustibilii fosili cei mai larg utilizați pe plan mondial.

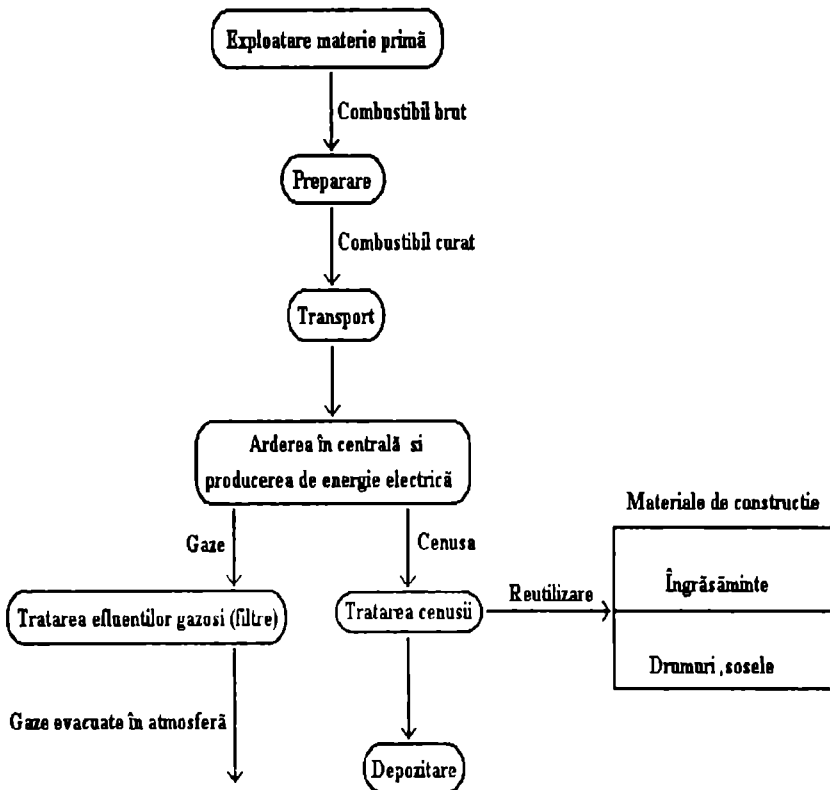


Figura 12.2: Ciclul combustibililor fosili

12.2.1. RADIOACTIVITATEA NATURALĂ A COMBUSTIBILILOR FOLOSIȚI ÎN CENTRALELE TERMoeLECTRICE

Combustibilul folosit într-o centrală termoelectrică (cărbune, țiței, gaz natural, turbă) conține izotopi radioactivi naturali în concentrații variabile, în funcție de tipul și zona de extracție a acestuia.

În tabelul 12.1 sunt date activitățile specifice medii pe glob (\bar{A}_s) ale cărbunelui, datorate diferiților izotopi radioactivi naturali. Pentru comparație, sunt date limitele de variație ale aceluiași activități specifice \bar{A}_s la cărbunele extras în România în diferite mine din țară.

Tabelul 12.1: Radioactivitatea naturală a cărbunelui pe glob și în România. Activitatea specifică a cărbunelui generată de izotopii radioactivi naturali (ref.[11]).

Izotopul radioactiv natural	\bar{A}_s (pe glob) (Bq/kg)	\bar{A}_s (România) (Bq/kg)
^{40}K	50	30 ÷ 650
^{238}U	20	1 ÷ 100
^{232}U	20	1 ÷ 50
^{226}Ra	...	1 ÷ 150

Producția anuală de cărbune este de ordinul a $3 \cdot 10^{12}$ kg, din care cea mai mare parte este arsă în centralele termoelectrice. Pentru producerea unei energii de 1 GW , an, se consumă aproximativ $3 \cdot 10^9$ kg cărbune.

Turba este produsă și exploatată în zonele cu mlaștini.

Radionuclizii sunt transportați în mlaștinile de turbă de către apele subterane și sunt asimilați în turbă. Turba uscată conține ^{238}U în concentrații variind între 40 ÷ 10.000 Bq /kg. Consumul de turbă pentru 1 GW , an energie electrică este comparabil cu cel de cărbune (cca. $5 \cdot 10^6$ tone).

Radioactivitatea gazelor naturale datorată radonului este de cca. 1 kBq /m³. Producția mondială anuală este de cca. 10^{12} m³, iar pentru a produce 1 GW , an de energie electrică se ard cca. $2 \cdot 10^9$ m³.

12.2.2. EXPLOATAREA ZĂCĂMINTELOR DE COMBUSTIBILI FOSILI ȘI PREPARAREA COMBUSTIBILULUI

Ciclul combustibilului fosil începe cu exploatarea minereului sau a depozitelor de gaze naturale. Când depozitele de cărbune se află la suprafață este posibilă exploatarea deschisă a acestora. Pentru depozitele de cărbune aflate la adâncime (până la 2000 m), exploatarea se face prin minerit subteran. În general, pentru minele din subteran este necesară o tehnologie mai avansată și o ventilare a galeriilor pentru a se ajunge la paturile de cărbune. Cărbunele este dislocat, sfărâmat și transportat la suprafață.

Cărbunele conține ^{14}C , dar și ^{40}K , uraniu, thoriu, și toți descendenții acestora în concentrații care depind de zona geografică, de adâncimea minei, etc. Prin dislocarea și sfărâmarea cărbunelui, radonul este mai ușor emanat din rocă în aerul din galerii și crește concentrația acestuia mult peste valoarea normală.

Prin aducerea la suprafață a cărbunelui începe redistribuirea izotopilor radioactivi naturali din aceste zăcămintele.

Minerii sunt expuși la o iradiere suplimentară consistentă față de cea normală, mai ales datorită radonului acumulat în galeriile subterane care, chiar în cazul unei ventilații eficiente, se află în concentrații mai mari decât în aerul atmosferic de la suprafață.

Depozitele de petrol și cele de gaz se află la adâncime, sub pământ, sau în subsolul mărilor și oceanelor. Când începe exploatarea unui astfel de depozit, o parte din gaz este eliberată în atmosferă. La exploatările făcute pe uscat, acest gaz este evacuat prin coșuri înalte și aprins, în timp ce la exploatările făcute pe platforme maritime gazul este eliberat în aer.

Gazele, ca și țițeiul și cărbunele, conțin izotopi radioactivi naturali care, prin activitatea de exploatare a combustibililor fosili, sunt redistribuiți și concentrați (cazul gazelor arse în atmosferă).

Celelalte tipuri de combustibili fosili conțin, de asemenea, izotopi radioactivi naturali, activitatea specifică a acestora variind în funcție de zona de extracție. În gazele naturale, radonul are o concentrație tipică de 1 kBq/m^3 .

În categoria combustibililor clasici intră și turba, un combustibil care se formează și se exploatează în zonele mlăștinoase. Izotopii radioactivi naturali conținuți de turbă sunt cei transportați de apele subterane în mlaștinile de turbă (U, Th, etc.). Conținutul de ^{238}U variază în limite foarte largi în turba preparată în diverse zone ($40 \div 10.000 \text{ Bq/kg}$).

Prin creșterea gradului de mecanizare a mineritului, extragerea cărbunelui se face și din zăcămintele relativ sărace în cărbune. Minereul extras conține o cantitate mare de material inert care este, în cea mai mare parte, separat de cărbune în cadrul procesului de prelucrare a combustibilului. Frația de material inert rămas în combustibil va forma cenușa rezultată după arderea cărbunelui în centrală.

Tot în faza de preparare a combustibilului, se urmărește îndepărtarea sulfului din minereu, în special a sulfului aflat sub formă de pirită.

Tehnicile de preparare a combustibilului sunt foarte variate, dar majoritatea implică spălarea cu apă. În tehnicile uzuale, minereul este sfărâmat, centrifugat, cernut, separându-se în final particulele mici de cărbune (combustibilul util) de particulele de pirită sau de materiale inerte care formează deșeurile solide. Urmează transportul cărbunelui spre centrală, cu trenul sau cu vaporul.

Izotopii radioactivi naturali aduși din adâncuri la suprafață se distribuie atât în materialul inert, depozitat sub forma unor munți (halde) de steril, cât și în materialul combustibil, continuându-și călătoria spre centralele electrice.

Gazele naturale și țițeiul au un proces de preparare mai redus și sunt transportate prin conducte și cisterne.

12.2.3. ARDEREA COMBUSTIBILULUI ÎN TERMOCENTRALĂ

Ajuns la centrală, combustibilul este receptionat, depozitat, transferat, procesat (sau nu) și apoi este introdus în cazanul (furnalul) în care urmează a fi ars.

Impactul asupra mediului în etapele de manipulare a cărbunelui este corelat cu capacitatea mare de emanație datorită stării fizice sub care se prezintă (pulbere), a cantităților foarte mari de combustibil depozitat sau manipulat și a suprafețelor mari de emanație.

Impactul asupra mediului în timpul arderii oricărui combustibil este corelat cu emisiile în mediu (solide, lichide, gazoase).

Produsele rezultate din arderea cărbunelui sunt:

□ *zgura*, care se depune pe fundul furnalului; ea reprezintă „cenușa grea” și este formată din partea minerală a cărbunelui în care materia organică este incomplet arsă, reprezentând 20 % din produsele de ardere solide;

□ *cenușa ușoară (sau „cenușa zburătoare”)* care scapă de filtrele coșurilor de evacuare și ajunge în atmosferă, de unde se depune pe sol; conține 80% din produsele de ardere solide;

□ *gaze fierbinți și minerale volatile.*

Concentrația izotopilor radioactivi naturali în cenușa zburătoare este mult mai mare decât în cărbune: are loc o concentrare a lor pe particulele cu dimensiuni mai mici ($\phi = 0,1 \div 0,2 \mu\text{m}$).

În tabelul 12.2 se compară activitatea specifică Λ_s a cenușilor zburătoare emise de diferite centrale din România, cu media pe glob pentru diferiți izotopi radioactivi naturali.

Dacă se compară activitățile cenușei cu cele corespunzătoare combustibilului (cărbune), se observă factori de concentrare
$$FC_{IR} = \frac{\Lambda_s(IR)_{\text{cenușă}}}{\Lambda_s(IR)_{\text{cărbune}}} \text{ relativ mari}$$
 ($FC = 1 \div 5$) realizați prin ardere.

La centralele vechi, 10 % din cenușile zburătoare scapă în atmosferă, iar la cele moderne numai 0,5 %.

Orice centrală emite anual în atmosferă o cantitate de cenușă, deci și o cantitate de izotopi radioactivi naturali, care depinde de puterea centralei (cantitatea de cărbune ars) și de tipul ei (modernă sau veche). La o centrală veche, emisia anuală pe unitatea de energie produsă este de 20 de ori mai mare decât emisia unei centrale moderne.

Radonul este integral eliberat în atmosferă (el nu poate fi reținut pe filtre), măbind mult radioactivitatea atmosferică față de cea normală, la care se adaugă și contribuția descendenților săi ^{210}Pb , ^{214}Bi , care se fixează pe aerosoli.

Tabelul 12.2: Activitatea specifică a cenușilor zburătoare emise de diferite centrale din România și activitatea specifică medie pe glob pentru diferiți izotopi radioactivi naturali(ref.[11])

IRN	$\bar{\Lambda}_s$ (pe glob) (Bq / kg)	Λ_s (România) (Bq / kg)
^{40}K	265	160 ÷ 1200
^{238}U	200	2 ÷ 312
^{226}Ra	240	3 ÷ 520
^{210}Pb	930	10 ÷ 500
^{210}Po	1700	2 ÷ 170
^{232}Th	70	2 ÷ 170

Date fiind cantitățile mari de combustibili arși, de cantitățile mari de izotopi radioactivi naturali eliberați în atmosferă, se poate vorbi clar de o poluare radioactivă a mediului, generată de centralele pe bază de combustibil fosil în general și de centralele pe bază de cărbune în particular.

Emisia radioactivă anuală (ERA) pe unitatea de energie furnizată de o centrală modernă este evaluată conform tabelului 12.3.

Tabelul 12.3: Emisia radioactivă anuală pe unitatea de energie furnizată de o centrală cu cărbune (ref.11)

IRN	Centrală nouă (MBq/GW·an)	Centrală veche (MBq/GW·an)
^{40}K	600	1000
^{238}U	250	300
$^{232}\text{Th} + ^{228}\text{Th}$	250 + 250	150
^{226}Ra	250	300
^{210}Pb	750	-
^{210}Po	750	-

Norul de cenușă, purtat de vânt se poate deplasa și, treptat, cenușa zburătoare cade spre sol, se depune pe plante, în apă, provocând o contaminare radioactivă a acestora.

Dozele individuale și colective suplimentare față de cele naturale depind de emisia de izotopi radioactivi naturali de la centrală, de înălțimea coșului de evacuare, de roza vânturilor, de densitatea populației, etc.

Populația care lucrează în centrală sau care locuiește în zonă este cel mai puternic afectată. Una dintre cele mai afectate zone din România este cea de lângă centrala Deva - Mintia, unde un locuitor primește anual o doză suplimentară de $300 \div 500 \mu\text{Sv} / \text{an}$.

La o centrală electrică pe bază de petrol se consumă $\sim 2 \cdot 10^7$ tone petrol pentru a produce 1 GW . an. Aceste centrale nu au filtre pentru aerosoli și au loc emisii de 200 MBq pentru ^{238}U , 300 MBq pentru ^{226}Ra , 150 MBq pentru ^{232}Th , 1000 MBq pentru ^{40}K , comparabile cu cele ale unei centrale pe bază de cărbune moderne.

În cazul unei centrale pe bază de gaz se ard $\sim 2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ gaze naturale pentru a produce 1 GW . an energie electrică și are loc o emisie de radon de $\sim 2 \text{ TBq}$.

Dacă se folosește turba drept combustibil, prin arderea a $5 \cdot 10^7$ tone turbă se obține o energie de 1 GW . an. Cenușile de turbă sunt bogate în uraniu și trebuie stocate pe termen lung, contribuind astfel la modificarea radioactivității naturale a mediului.

Combustibilul de tip cărbune, țiței, gaz, turbă, este folosit nu numai la centralele electrice, dar și la centralele termice, pentru încălzirea clădirilor, în gospodării sau în diferite industrii. Cantitatea de combustibil ars anual este mult mai mare decât cea evaluată pentru centralele termoelectrice cu combustibili fosili, deci și dozele de iradiere sunt suplimentate prin aceste activități.

12.2.4. UTILIZAREA CENUȘILOR DE LA CENTRALELE TERMoeLECTRICE PE BAZĂ DE CĂRBUNE

Producția anuală de cărbune pe glob este de aproximativ $3 \cdot 10^{10}$ tone, din care $\sim 70\%$ este consumat de centralele pe bază de combustibili fosili ($\sim 2 \cdot 10^9$ tone). Producerea anuală de cenușă pe glob este de ordinul a $3 \cdot 10^8$ tone.

Acastă cenușă și-a găsit o largă utilizare practică, fiind folosită ca materie primă la fabricarea betoanelor, a asfalturilor, etc. Numai în construcții se utilizează anual cca. 10^7 tone de cenușă (adică $\sim 10\%$ din producția anuală de cenușă).

Încăperile ai căror pereți sunt făcuți din astfel de betoane au un fond de radiații mai mare decât fondul din exteriorul clădirii: din pereți emană radonul în aerul din încăpere, acesta se dezintegrează și produce alți izotopi radioactivi naturali (Po, Bi, Pb, Tl). Se amplifică atât iradierea externă, cât și cea internă (prin inhalare) a persoanelor ce lucrează sau locuiesc în astfel de clădiri, ajungându-se la doze suplimentare de cca. 70 μ Sv pe an.

12.3. COMBIMATELE DE ÎNGRĂȘĂMINTE FOSFATICE

Creșterea productivității în agricultură s-a bazat și se bazează încă, în mod esențial, pe utilizarea îngrășămintelor fosfatice. Consumul mondial anual de astfel de îngrășămintă este de cca. $3 \cdot 10^7$ tone de P_2O_5 . Fertilizarea unui hectar de pământ se face prin administrarea unei cantități de P_2O_5 ce variază între $3,5 \div 11$ kg /ha.

Îngrășămintele fosfatice se obțin din roci fosfatice, după un flux tehnologic reprezentat schematic în fig. 12.3.

Există trei mari tipuri de roci fosfatice care diferă prin originea lor: roci sedimentare, roci vulcanice și roci de origine biologică. Rezerva cea mai mare de fosfor este conținută în rocile sedimentare. Țările cu cele mai bogate rezerve de roci fosfatice sunt China, SUA, fosta URSS și Maroc, ele fiind și principalii furnizori de materie primă pentru combimatele de îngrășămintă fosfatice din diverse țări de pe glob.

Rocile fosfatice conțin izotopi radioactivi naturali în concentrații care depind de tipul de rocă, dar și de locul de origine. Concentrațiile de ^{40}K și ^{232}Th sunt practic aceleași în toate tipurile de rocă fosfatică și sunt comparabile cu cele din solurile normale. Concentrația de ^{238}U și concentrațiile produșilor săi de dezintegrare depășesc valorile din solurile normale numai în rocile fosfatice de origine sedimentară, care ating valori de cca. 1500 Bq /kg, cu variații care depind de zona geografică: cele mai mari concentrații de ^{238}U le au rocile din SUA (partea de nord), urmate de cele din Maroc și fosta URSS.

Prin întregul proces tehnologic care începe cu exploatarea și prepararea preliminară a materiei prime și care se termină cu utilizarea produselor și subproduselor și a deșeurilor de la combimatele de îngrășămintă fosfatice, are loc o modificare tehnologică a surselor de iradiere naturală a populației.

În funcție de procedeul de prelucrare a rocii, are loc o redistribuire a izotopilor radioactivi naturali (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th și descendenții lor) în efluenți, în produse, subproduse și deșeuri.

Unul din procedeele de prelucrare, numit „procedeul umed”, presupune tratarea rocii cu acid sulfuric, proces în urma căruia rezultă acidul fosforic și fosfogipsul (deșeu). În acest procedeu de separare, are loc și o separare a izotopilor radioactivi naturali conținuți în rocă, pe cele două componente: U și Th se separă împreună cu acidul fosforic, iar radiul (^{226}Ra) trece în fosfogips. În continuare, acidul fosforic (cu conținut de U și Th) este tratat cu amoniac pentru obținerea unor îngrășămintă chimice de tip „diaminofosfat” care, la rândul lor, conțin concentrații mari de U și Th și concentrații mici de ^{226}Ra .

Îngrășămintele de tip „tripolifosfat” se prepară printr-o altă tehnologie: roca măcinată este tratată cu acid fosforic, iar produsul - tripolifosfatul - conține în concentrații mari atât ^{238}U și ^{232}Th , cât și ^{226}Ra (din rocă).

Utilizarea îngrășămintelor fosfatice cu conținut ridicat (peste normal) de izotopi radioactivi naturali pentru fertilizarea solurilor înseamnă împrăștierea unor cantități din aceste substanțe pe suprafața terenurilor arabile destinate diferitelor culturi.

Efectele, din punctul de vedere al radioactivității mediului și al expunerii populației sunt ușor de evidențiat. În primul rând, odată cu împrăștierea (din avion sau manual, de la sol) a îngrășămintelor se produce și creșterea debitului dozei absorbite în aer la 1m de sol. Astfel, crește doza de iradiere externă și internă (prin inhalare) a persoanelor implicate în muncile agricole pe aceste terenuri.

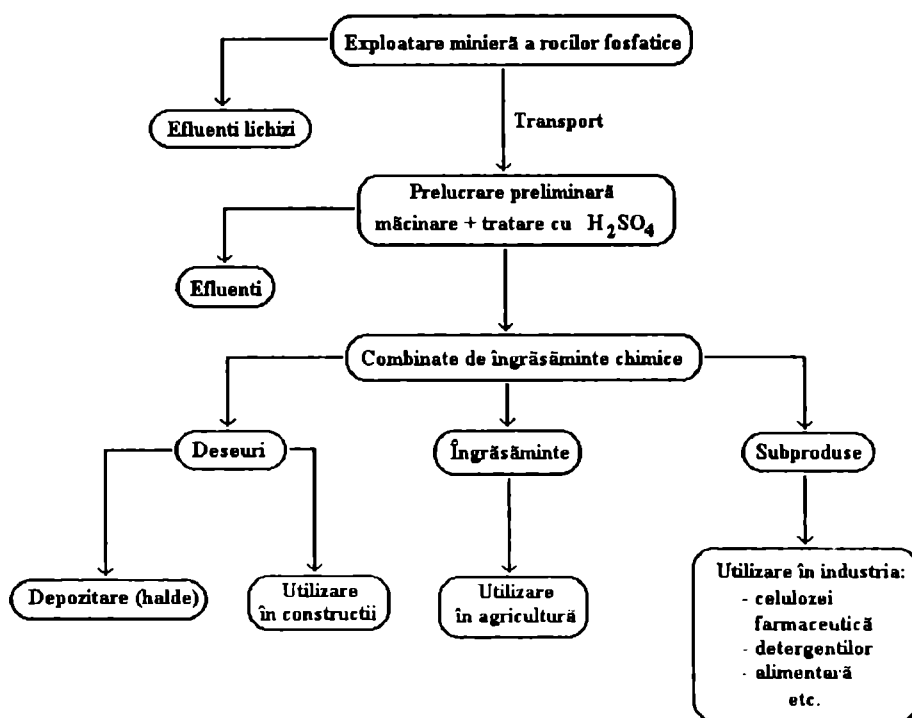


Figura 12.3: Schema fluxului tehnologic de obținere a îngrășămintelor fosfatice din roci fosfatice

În al doilea rând, recoltele obținute pe aceste terenuri au un conținut crescut de izotopi radioactivi naturali, fapt care determină o creștere a dozei interne a persoanelor care consumă aceste produse agricole.

În al treilea rând, trebuie avut în vedere faptul că, prin fertilizarea anuală, repetată a unui teren, are loc o acumulare în timp de izotopi radioactivi naturali (U și Ra) în sol, care este cu atât mai mare cu cât cantitatea totală de îngrășământ administrat a fost mai mare. Acest fapt se reflectă atât în creșterea dozei debit în atmosfera de deasupra solului, cât și în radioactivitatea crescută a produselor agricole de pe aceste soluri.

O largă utilizare au subprodusele de la combinatele de îngrășăminte fosfatice la industrii cum sunt cea farmaceutică, alimentară, de nutrețuri, etc., deci în industrii în care produsele sunt consumate (ingerate) direct de om sau de animale și odată cu acestea izotopii radioactivi naturali care au fost concentrați în subprodusele fosfatice.

De asemenea, subprodusele sunt utilizate în fabricile de hârtie și de detergenți, deci a unor produse care prin manipulare produc o expunere suplimentară externă, dacă au un conținut de izotopi radioactivi naturali peste normal.

Deșeurile rezultate din procesul tehnologic - fosfogipsul - dă cea mai mare contribuție la iradierea suplimentară a populației, fie datorită depozitării sale sub forma unor halde uriașe care ridică probleme ecologice, fie datorită utilizării sale ca material de construcție a locuințelor.

Fosfogipsul are conținut mare de ^{226}Ra și pereții locuințelor la care s-a folosit acest material emană radon. Aerul din încăperi conține descendenți radioactivi ai radonului în concentrații mari, iar riscul de cancer pulmonar pentru locatari este mult crescut. Este motivul pentru care s-a interzis utilizarea fosfogipsului la construirea locuințelor.

12.4. ALTE CĂI DE CREȘTERE A EXPUNERII LA RADIAȚII ÎN INTERIORUL CLĂDIRILOR ȘI ÎN AFARA LOR

În locuințe, radioactivitatea naturală a aerului este modificată în primul rând datorită emanațiilor radioactive din pereți (radon și descendenți săi), mai ales dacă aceștia conțin izotopi radioactivi naturali (uraniu, thoriu) în concentrații mari.

Folosirea gazelor naturale sau a altor combustibili cu un conținut ridicat de izotopi radioactivi naturali la încălzirea locuinței și la prepararea hranei, utilizarea apelor geotermale ca ape menajere sau în tratamente medicale în stațiunile balneoclimaterice sunt tot atâtea surse de creștere a nivelului de radioactivitate în interiorul clădirilor și de iradiere suplimentară a persoanelor implicate în aceste activități (fig. 12.4).

În figura 12.4 este dată contribuția diferitelor surse de radon într-o casă tipică. Prin simpla folosire a dușului la baie crește concentrația de radon în aerul din baie datorită capacității mai mari de emanație a apei pulverizate. De aceea se recomandă aerisirea frecventă și eficientă a încăperilor, a băilor și a bucătăriilor.

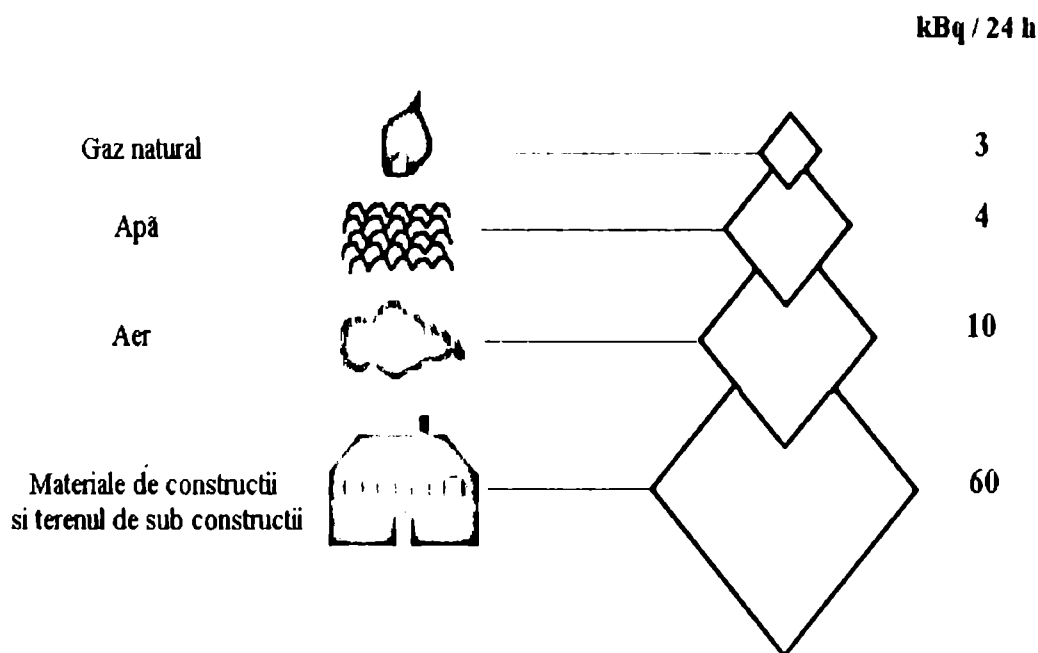


Figura 12.4: Contribuția diferitelor surse de radon într-o casă tipică (ref. [14])

Folosirea subsolurilor drept locuințe, transportul subteran (metrou), în condițiile în care nu există o ventilație foarte bună, înseamnă o iradiere suplimentară datorată radonului care se acumulează în aerul din subsoluri și din tunele.

Transportul auto, în special în zonele urbane, este o sursă de poluare chimică, dar și radioactivă, datorită conținutului crescut de izotopi radioactivi naturali în fumul și gazele evacuate în aer față de acela din combustibilul folosit.

Utilizarea apelor industriale „uzate” sau a apelor de zăcământ (petrolier) la irigarea terenurilor agricole sau pur și simplu deversarea lor în apele de suprafață fără un control prealabil al nivelului lor de radioactivitate și aplicarea unor măsuri de protecție a mediului pot să ducă la poluarea radioactivă a solului, a apei și a aerului atmosferic din zona respectivă și implicit a vegetației și faunei.

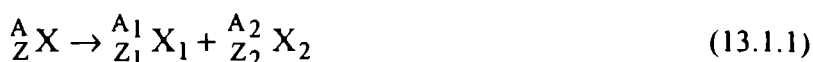
Multitudinea și complexitatea căilor și mijloacelor prin care omul poate să modifice radioactivitatea naturală a mediului impune cu necesitate un sistem foarte bine pus la punct de supraveghere a radioactivității mediului și de informare, precum și o legislație care să sprijine și să stimuleze eforturile făcute pentru păstrarea sub control a nivelului de radioactivitate a mediului în toate domeniile de activitate.

CAPITOLUL 13

FISIUNEA NUCLEARĂ - SURSĂ DE ENERGIE ȘI DE IZOTOPI RADIOACTIVI ARTIFICIALI (IRA)

13.1. FISIUNEA SPONTANĂ ȘI INDUSĂ

Prin „fisiune nucleară” se înțelege, de obicei, scindarea unui nucleu în două fragmente nucleare de mase aproximativ egale (fisiune binară):



cu: $Z = Z_1 + Z_2$ și $A = A_1 + A_2$

Mai întâi a fost observat fenomenul de „fisiune indusă”, realizat de Otto Hahn în 1939 (Berlin) împreună cu colaboratorii săi, prin bombardarea uraniului ${}_{92}^{238}\text{U}$ cu neutroni. În produșii de reacție, ei au identificat prezența unor izotopi radioactivi de tipul ${}_{56}^{140}\text{Ba}$ care nu putea fi explicată decât prin fisiunea (sciziunea) nucleului ${}_{92}^{238}\text{U}$. Totodată, Otto Hahn a prezis posibilitatea ca în acest proces să se emită neutroni, fapt confirmat experimental de F. Joliot-Curie: în urma fiecărui act de fisiune rezultă $2 \div 3$ neutroni.

Studii ulterioare au stabilit că fisiunea indusă se poate realiza și cu radiații γ și cu particule care au sarcină electrică (p , α , etc.), accelerate la energii suficient de mari pentru a învinge bariera coulombiană a nucleului-țintă și pentru a produce reacții nucleare de fisiune.

Reacțiile de fisiune cele mai importante s-au dovedit a fi reacțiile cu neutroni (atât termici, cât și rapizi) datorită implicațiilor practice pe care le au.

În anul 1940, fizicienii K. A. Petrszak și G. N. Flerov (Leningrad) au observat pentru prima dată „fisiunea spontană”, fără agent exterior, a nucleelor de ${}_{92}^{238}\text{U}$ cu o perioadă de înjumătățire prin fisiune spontană $T_{1/2}^{\text{SF}} = 6,5 \cdot 10^{19}$ ani, foarte mare în comparație cu perioada de înjumătățire prin dezintegrare α a acelorași nuclee $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ ani. Ulterior, s-a stabilit că și alți nuclizi fisionează spontan: ${}_{90}^{230}\text{Th}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$, ${}_{92}^{232}\text{U}$, ${}_{92}^{234}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, cu perioade $T_{1/2}^{\text{SF}}$ cuprinse între $10^{11} \div 10^{21}$ ani. Nuclelele mai grele decât acestea au perioade $T_{1/2}^{\text{SF}}$ din ce în ce mai mici.

De asemenea, a fost observată și sciziunea nucleelor în trei fragmente - „fisiune ternară” - dar care se realizează cu o probabilitate mult mai mică.

Fisiunea nucleară, atât cea spontană, cât și cea indusă, se caracterizează prin:

- cantitate mare de energie eliberată într-un act de fisiune;
- o gamă largă de izotopi radioactivi rezultați ca produși de fisiune;

■ emisia de neutroni care, în anumite condiții, fac ca reacția de fisiune să fie autoîntreținută.

Teoria elementară a fisiunii nucleare (N. Bohr și I. A. Wheeler, 1939) se bazează pe modelul „picăturii de lichid nuclear”. Conform acestui model, energia de legătură $B(Z, A)$ a nucleului ${}_Z^AX$ se estimează (pentru un nucleu par-par, de exemplu) prin relația:

$$B(Z, A) = a_v \cdot A - a_s \cdot A^{2/3} - a_c \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \cdot \left(\frac{A - 2Z}{A} \right)^2 + a_p \cdot A^{-3/4} \quad (13.1.2)$$

cu a_v, a_s, a_c, a_a, a_p constante corespunzătoare termenilor de volum, de suprafață, coulombian, de asimetrie și de cuplare în perechi. Dintre aceștia, termenul de suprafață ($E_s = a_s A^{2/3}$) și cel

coulombian ($E_c = a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$) depind de forma nucleului, iar ceilalți termeni depind doar de numărul total (A) de particule din nucleu.

Se presupune că procesul de fisiune începe cu deformarea nucleului, de la forma sferică la cea de elipsoid de rotație, în urma excitării cu un agent exterior a unor vibrații ale suprafeței nucleare, sau datorită vibrațiilor de zero ale nucleului.

Energia de legătură a nucleului se modifică, deoarece se modifică termenul de suprafață și cel coulombian din relația (13.1.2). Forța de tensiune superficială se opune alungirii nucleului, în timp ce respingerea coulombiană dintre protoni tinde să accentueze alungirea nucleului, ajungând până la „gâtuirea” și apoi scindarea acestuia în două fragmente mai mici (fig. 13.1).



Figura 13.1: Fazele parcurse de un nucleu în procesul fisiunii binare

În funcție de raportul dintre forțele coulombiene și cele de suprafață, nucleul poate reveni la forma inițială sau se poate scinda. Condiția de stabilitate relativă a nucleului față de fisiune cere ca energia de legătură $B(Z, A)$ să crească ($\Delta B > 0$) atunci când nucleul suferă deformarea elipsoidală inițială. Dacă se descrie această deformare prin ecuația suprafeței elipsoidale

$$R(\theta) = \frac{1}{\lambda} R_0 \left(1 + \epsilon \cdot P_2(\cos \theta) \right) \quad (13.1.3)$$

unde R_0 este raza picăturii sferice inițiale, $P_2(\cos \theta)$ polinomul Legendre, ϵ parametrul de deformare cuadripolară, iar λ este o constantă care asigură conservarea volumului nuclear, se poate evalua variația energiilor de suprafață E_s și coulombiană E_c , în funcție de parametrul de deformare ϵ , în felul următor:

$$E_s(\epsilon) = E_s^0 \left(1 + \frac{2}{5} \epsilon^2 \right) \quad (13.1.4)$$

$$E_c(\epsilon) = E_c^0 \left(1 - \frac{1}{5} \epsilon^2 \right) \quad (13.1.5)$$

cu

$$E_s^0 = a_s \cdot A^{2/3} \quad \text{și} \quad E_c^0 = a_c \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad (13.1.6)$$

Astfel:

$$\Delta E_s = E_s(\epsilon) - E_s^0 = E_s^0 \cdot \frac{2}{5} \cdot \epsilon^2 \quad (13.1.7)$$

$$\Delta E_c = E_c(\epsilon) - E_c^0 = E_c^0 \cdot \frac{1}{5} \cdot \epsilon^2 \quad (13.1.8)$$

$$\Delta B = \Delta E_s + \Delta E_c = E_s^0 \cdot \epsilon^2 \cdot \frac{2}{5} \cdot \left(1 - \frac{E_c^0}{2 E_s^0} \right) \quad (13.1.9)$$

În fig. 13.2.1 sunt reprezentate grafic energia de suprafață $E_s(\epsilon)$, energia coulombiană $E_c(\epsilon)$ și suma lor $E_s(\epsilon) + E_c(\epsilon)$, în funcție de parametrul de deformare, iar în fig. 13.2.2 în funcție de deformare și de parametrul de fisiune Z^2 / A .

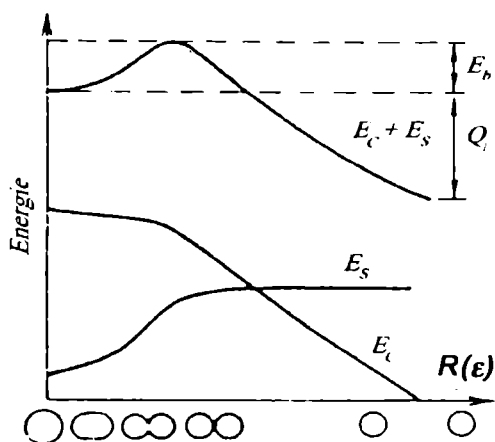


Figura 13.2.1 Variația energiilor nucleare $E_s, E_c, E_s + E_c$, cu deformarea și formarea barierei de fisiune. $R(\epsilon)$ este distanța dintre centrele celor două fragmente nucleare.

a) Când $\Delta B > 0$ ($\frac{E_c^0}{2E_s^0} < 1$ sau $\frac{Z^2}{A} < 49$) nucleul revine la forma inițială. Energia de excitare este emisă sub formă de radiații γ . Nucleul este caracterizat de o barieră de fisiune de înălțime E_b . Un astfel de nucleu va fisiona numai prin tunelarea barierei de fisiune sau prin activarea sa cu o energie din exterior ($E_a \sim E_b$) suficientă pentru escaladarea barierei.

b) Când $\Delta B < 0$ ($\frac{E_c^0}{2E_s^0} > 1$ sau $\frac{Z^2}{A} > 49$) nucleul se deformează în continuare, până când se scindează. Nucleul va fisiona fără nici o barieră, fără energie de activare din exterior

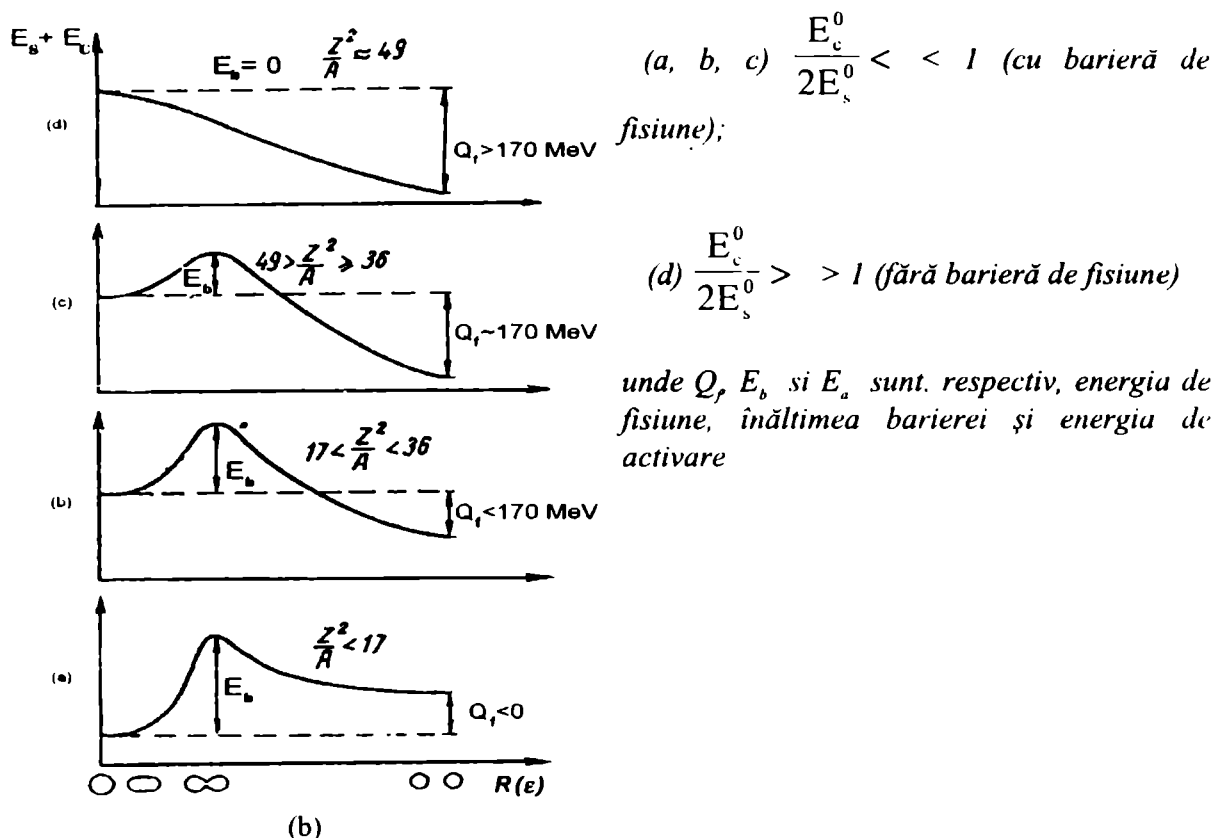


Figura 13.2.2: Variația energiilor nucleare în funcție de parametrul de deformare și de Z^2/A

Situația critică, de tranzit de la cazul a) la cazul b), se realizează când $\Delta B = 0$ sau $\frac{Z^2}{A} = 49$ și anume în zona nucleelor foarte grele, cu $Z \approx 120$ și $A \approx 290$.

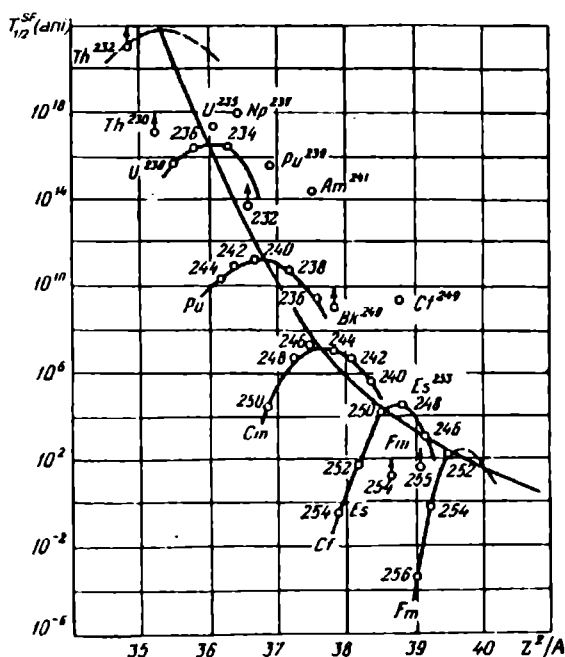
Raportul $\frac{Z^2}{A}$ se numește „parametru de fisiune”, iar valoarea lui pentru un nucleu dat dă o măsură a stabilității sale față de fisiunea binară: cu cât $\frac{Z^2}{A}$ este mai mic decât valoarea critică 49, cu atât șansa sa de a fisiona este mai mică (fig. 13.2 - b)

Experimental s-a constatat că, atât fisiunea spontană, cât și cea indusă cu neutroni termici, se produc doar în cazul nucleelor grele ($Z > 90$).

În fig. 13.3 este reprezentată o sistematică a valorilor experimentale ale perioadelor de înjumătățire prin fisiune spontană ($T_{1/2}^{SF}$) în funcție de parametrul de fisiune $\frac{Z^2}{A}$ pentru nuclee cu diferite valori Z pare.

Se observă că, pe măsură ce Z crește, probabilitatea de fisiune spontană a nucleelor crește, perioadele de înjumătățire $T_{1/2}^{SF}$ ajungând la valori foarte mici față de cea a ${}_{92}^{238}\text{U}$. Astfel, ${}_{100}^{258}\text{Fm}$ are $T_{1/2}^{SF} = 3,8 \cdot 10^{-4}$ s, cu multe ordine de mărime mai mică decât cea a ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Figura 13.3: Sistematica valorilor experimentale ale perioadelor de înjumătățire prin fisiune spontană în funcție de parametrul de fisiune $\frac{Z^2}{A}$ pentru nuclee cu diferite valori Z pare.



Un caz interesant îl prezintă ${}_{98}^{252}\text{Cf}$ care are $T_{1/2}^{SF} = 2,5$ ani, suficient de mare pentru a se putea acumula în cantități relativ mari și în același timp suficient de mică pentru ca probele de ${}_{92}^{252}\text{Cf}$ să fie folosite drept surse intense de neutroni de fisiune.

Din aceste curbe experimentale s-a dedus o formulă semiempirică pentru $T_{1/2}^{SF}$ și una pentru înălțimea barierei de fisiune:

$$T_{1/2}^{SF} = 10^{-21} \cdot \left(10^{178 - 3,75 \frac{Z^2}{A}} \right) \text{ sec} \quad (13.1.10)$$

și

$$E_b = 19 - 0,36 \cdot \frac{Z^2}{A} + \epsilon \quad (13.1.11)$$

unde ϵ are valori diferite pentru nucleele cu: Z și N -impare, Z și N pare sau Z și N cu parități inverse.

Relativ la fisiunea indusă cu neutroni, s-a observat experimental că unele nuclee grele (${}_{92}^{233}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$) fisionează în urma capturii neutronilor termici ($T_n \sim 0,025$ eV), în timp ce altele (${}_{90}^{232}\text{Th}$, ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{93}^{235}\text{Np}$, ${}_{94}^{241}\text{Pu}$) suferă același proces în urma ciocnirii cu neutroni rapizi cu energii $T_n \sim 0,5$ MeV. Așa cum s-a amintit, fisiunea indusă are loc prin escaladarea barierei

de fisiune, proces posibil prin aportul de energie adus de neutroni energia de activare E_a trebuie să fie mai mare decât înălțimea barierei E_b ($> 0,5$ MeV).

Prin captura unui neutron termic de către nucleul ${}^A_Z X$ și formarea nucleului compus $({}^{A+1}_Z X)^*$ se eliberează o cantitate de energie egală cu energia de legătură B_n a neutronului în nucleul compus. De exemplu:



cu

$$B_n = m({}^{92,235}) + m_n - m({}^{92,236}) = 6,536 \text{ MeV} \quad (13.1.13)$$

Această energie eliberată este suficientă pentru excitarea nucleului la energii E^* peste înălțimea barierei de fisiune ($E_a = 5,2$ MeV) și nucleul va fisiona.

În tabelul 13.1 sunt date energiile de activare și energiile eliberate prin captura neutronului pentru câteva nuclee grele fisionabile.

Nucleele pentru care $B_n - E_a > 0$ vor fisiona ușor chiar numai prin captura unui neutron termic și se numesc nuclee „fisile”. Nucleele cu $B_n - E_a < 0$ se vor scinda numai prin absorbția unui neutron rapid a cărui energie este mai mare decât $|B_n - E_a|$ care constituie energia de prag.

Pentru nucleele fisile, fenomenul de fisiune (n, f) cu neutroni termici este concurat de captura radiativă (n, γ).

În tabelul 13.2 sunt date secțiunile eficace (în barni, $1\text{barn}=10^{-28} \text{ m}^2$) ale celor două procese pentru câteva nuclee fisile. Se poate observa că fisiunea este mult mai probabilă (de circa șase ori) decât captura radiativă.

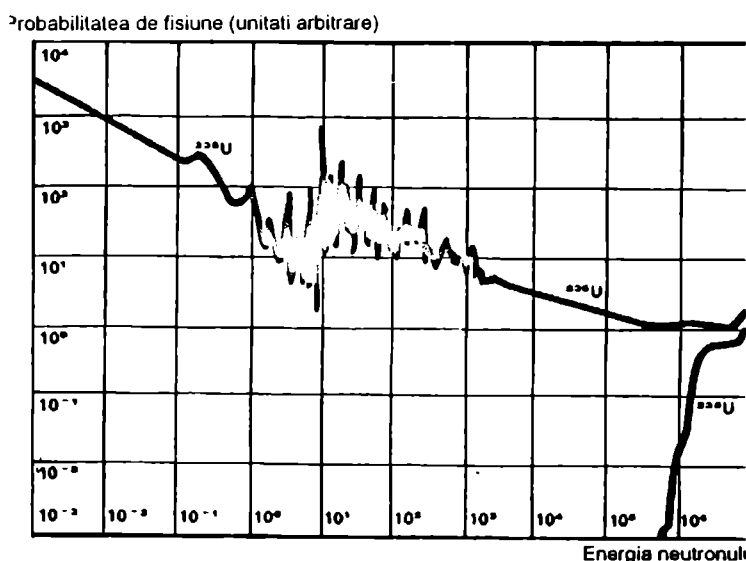
Tabelul 13.1: Comparație între energiile de activare și energiile eliberate la captura unui neutron termic pentru câteva nuclee grele fisionabile

Nucleul ${}^A_Z X$	Z, A	E_a (MeV)	B_n (MeV)	$B_n - E_a$ (MeV)	Tipul de nucleu
${}^{226}_{88}\text{Ra}$	34,26	6,2	4,5	- 1,7	
${}^{232}_{90}\text{Th}$	34,91	6,0	4,9	- 1,1	fertil
${}^{233}_{92}\text{U}$	36,32	5,1	6,8	+ 1,7	fisil
${}^{235}_{92}\text{U}$	36,01	5,2	6,5	+ 1,3	fisil
${}^{238}_{92}\text{U}$	35,56	5,7	4,8	- 0,9	fertil
${}^{239}_{94}\text{Pu}$	36,97	4,8	6,4	+ 1,6	fisil
${}^{240}_{94}\text{Pu}$	36,81	5,3	5,4	+ 0,1	fisil
${}^{242}_{96}\text{Cm}$	38,08	5,0	5,6	+ 0,6	fisil

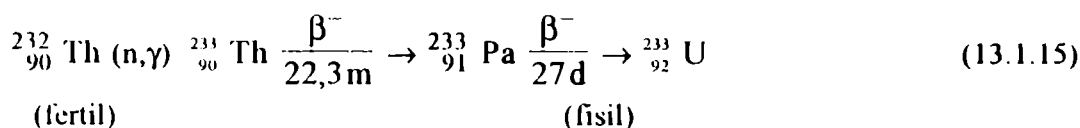
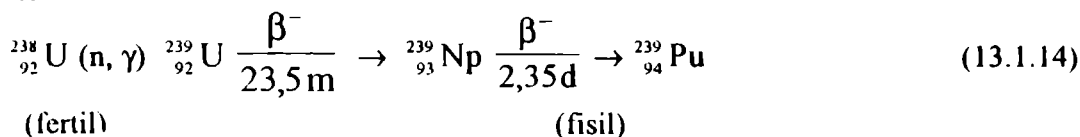
Tabelul 13.2: Secțiunile eficace de fisiune și de captură radiativă ale nucleelor fisile de ^{235}U , ^{238}U și ^{239}Pu

Secțiunea eficace pentru neutroni termici $T_n = 0,025 \text{ eV}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{239}_{94}\text{Pu}$
σ_{nf} (barn)	524	590	729
$\sigma_{n\gamma}$ (barn)	48	108	300

În fig. 13.4 se arată dependența secțiunilor efective σ_{nf} de energia neutronilor incidenti pe nuclee de ^{235}U și ^{238}U . Se observă o scădere a secțiunilor cu energia după legea $\sim 1/v$ (unde v este viteza neutronilor) în zona energiilor joase, dar și apariția unor picuri numite „rezonante” în zona energiilor de ordinul eV-ilor, generate de stările nucleului compus ^{236}U situate la energii E^* mai mari decât energia de legătură B_n a neutronului.


 Figura 13.4: Dependenta secțiunilor efective de fisiune (luate în unitati arbitrare) de energia neutronilor incidenti pe nuclee de ^{235}U și ^{238}U .

Printre nucleele grele care fisiunează cu neutroni rapizi pentru care reacția (n, f) este o reacție cu prag, există unele nuclee numite „fertile” care, prin captura (n, γ) a neutronilor termici și câteva dezintegrări β^- se transformă în nuclee „fisile”. Cele mai cunoscute sunt: $^{238}_{92}\text{U}$ și $^{232}_{90}\text{Th}$. Trecerea fertil - fisil se produce după schemele:



Într-o centrală nucleară, combustibilul nuclear conține în mod natural și nuclee fisile și nuclee fertile.

Nucleele fisile sunt cele care „ard” în combustibilul nuclear furnizând energie prin fisiunea lor. Nucleele fertile prezente în combustibilul nuclear se vor transforma în nuclee fisile sub acțiunea neutronilor termici din reactor, generând rezerve noi de combustibil nuclear fisil.

13.2. ENERGIA DE FISIUNE

Energia medie de legătură a unui nucleon din nucleele grele este de cca. 7,5 MeV /nucleon, în timp ce la nucleele de masă medie este de cca. 8,5 MeV /nucleon (fig.13.5). Această diferență explică tendința nucleelor grele de a trece prin fisiune în nuclee cu stabilitate mai mare.

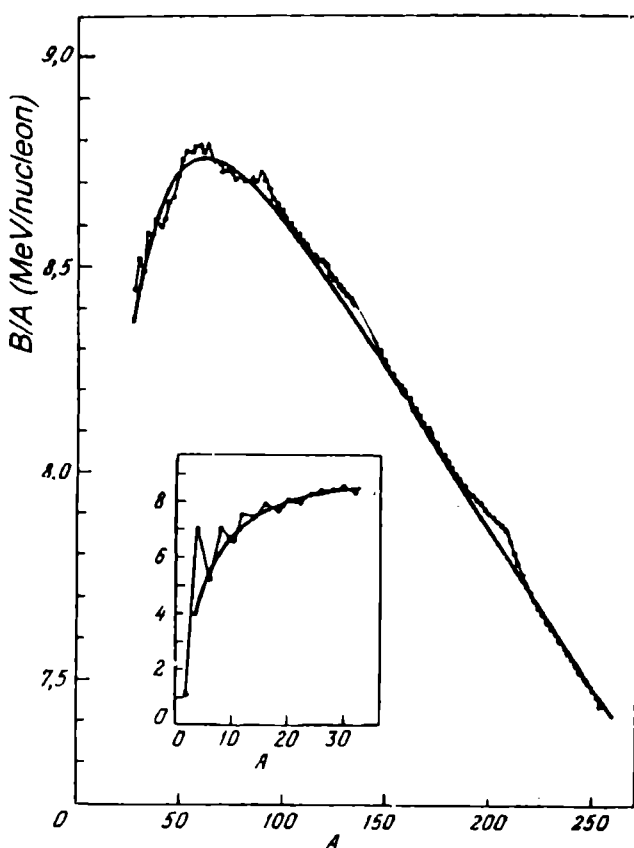
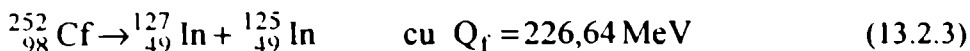
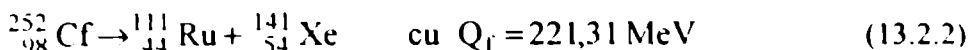


Figura 13.5: Dependența energiei medii de legătură a unui nucleon de numărul de masă A al nucleului

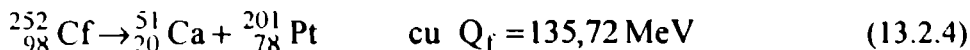
În urma fisiunii se eliberează o energie egală cu diferența dintre masa nucleului-părinte și masele fragmentelor nucleare, exprimate în unități energetice:

$$Q_f = m(Z, A) - m(Z_1, A_1) - m(Z_2, A_2) \quad (13.2.1)$$

Această energie este de cca. 200 MeV, după cum se observă în cazul concret al câtorva variante de fisiune ale $^{235}_{92}\text{U}$ în fragmente nucleare aproape simetrice:



și este mai mică în cazul fisiunilor foarte asimetrice:



Experimental s-a observat că nucleele fisionează cu probabilitate mai mare în fragmente cu mase comparabile (relatiile 13.2.2 și 13.2.3) decât în variante foarte asimetrice (relația 13.2.4).

În aceste condiții, se poate evalua energia eliberată în urma fisiunii complete a unui gram de ${}^{235}\text{U}$, dacă presupunem că, în medie, se eliberează 200 MeV /act de fisiune:

$$E = Q_f \cdot N_{fis} = 200 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{235} = 5,12 \cdot 10^{23} \text{ MeV} \quad (13.2.5)$$

sau

$$E = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ J} = 2,27 \cdot 10^4 \text{ kWh} \quad (13.2.6)$$

Această cantitate de energie este comparabilă cu energia eliberată prin arderea a cca. 2,7 tone de cărbune cu capacitatea calorică de $\sim 3 \cdot 10^4 \text{ J/g}$. Energia de fisiune se regăsește în prima fază a fisiunii sub formă de energie coulombiană mutuală a celor două fragmente primare ${}^{A_1}_{Z_1}\text{X}$ și ${}^{A_2}_{Z_2}\text{X}$ și sub formă de energie de excitare și de deformare a acestora, energia coulombiană fiind dominantă.

13.3. PRODUSELE DE FISIUNE

Derularea în timp a fisiunii unui nucleu imediat după sciziune, începe cu îndepărtarea celor două fragmente primare unul de celălalt cu viteză crescândă, datorită respingerii coulombiene. În același timp, fiecare fragment colapsează către forma sa de echilibru printr-o serie de transformări.

În momentul sciziunii, distanța dintre centrele fragmentelor ($Z_1 = 50$ și $Z_2 = 44$) este $d = 15 \text{ fm}$, iar energia coulombiană mutuală este:

$$E_c = 1,44 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{d(\text{fm})} = 210 \text{ MeV} \quad (13.3.1)$$

Când fragmentele ajung la o distanță $d \sim 150 \text{ fm}$ unul de celălalt, energia coulombiană se reduce de zece ori față de valoarea inițială, restul fiind convertită în energie cinetică, iar fragmentele ajung la viteze de cca. 10^7 m/s la 10^{-20} s față de momentul sciziunii.

Fiecare din fragmentele primare sunt „supraîncărcate” cu neutroni față de starea lor de echilibru:

$$\left(\frac{N_1}{Z_1}\right)_{fp} > \left(\frac{N_1'}{Z_1}\right)_{ech} \tag{13.3.2}$$

$$\left(\frac{N_2}{Z_2}\right)_{fp} > \left(\frac{N_2'}{Z_2}\right)_{ech} \tag{13.3.3}$$

stare moștenită de la nucleul-părinte care, ca orice nucleu greu, are în starea de echilibru raportul $\left(\frac{N}{Z}\right)_{ech}$ mai mare decât al nucleelor de masă medie $\left(\frac{N_1}{Z_1}\right)_{ech}, \left(\frac{N_2}{Z_2}\right)_{ech}$

De aceea, cam după $10^{-15} \div 10^{-18}$ s de la sciziune, după ce fragmentele primare au atins energia maximă, emit în medie $2 \div 3$ neutroni, numiți „neutroni prompti”. Aceștia sunt emiși după fisiune (nu în timpul ei !), când fragmentele sunt deja accelerate. Această concluzie se desprinde din distribuția spațială observată experimental care arată că neutronii prompti sunt emiși în direcțiile de mișcare ale celor două fragmente (în sistemul laboratorului).

Din spectrul energetic al neutronilor prompti redat în fig.13.5, s-a dedus o relație empirică a distribuției lor după energie:

$$N(E) dE = A e^{-E} \operatorname{sh} \sqrt{2E} dE \tag{13.3.3}$$

Neutronii prompti au energiile cuprinse între $0 \div 18$ MeV, cu un maxim între $0,7 \div 1$ MeV și energia medie $\bar{E} \cong 2$ MeV Ei reprezintă peste 99 % din numărul total de neutroni emiși prin fisiune.

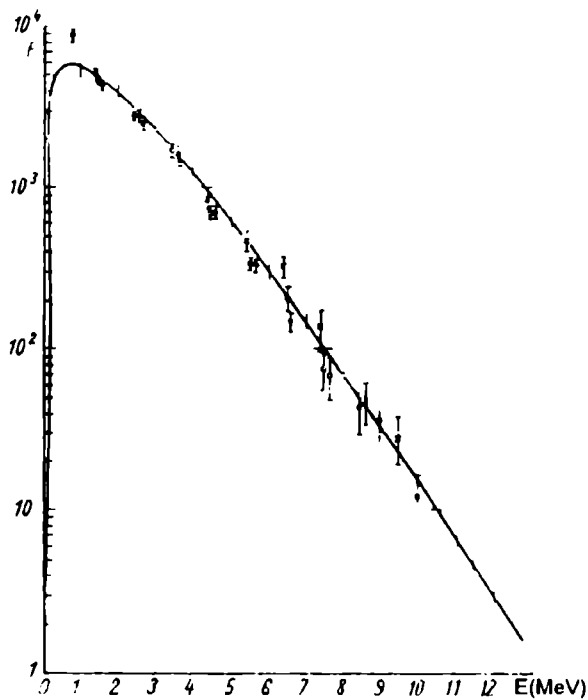
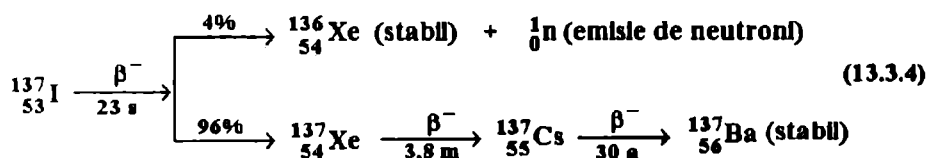


Figura 13.6: Spectrul energetic al neutronilor prompti

Energia necesară „evaporării” neutronilor prompti din fragmentele primare (~ 8 MeV/neutron) este luată din energia de excitare a acestora. Când energia de excitare a fragmentelor este mai mică decât energia de separare a unui neutron din structura lor, fragmentele încă bogate în neutroni se dezexcită trecând în starea fundamentală prin emisia de „raze γ prompte” (la $t < 10^{-11}$ s de la sciziune). În această fază, surplusul de neutroni este compensat prin modificarea sarcinilor electrice Z_1 și Z_2 ale fragmentelor. Această modificare se realizează prin dezintegrări β^- succesive (în lanț) până la produșii stabili, așa cum arată exemplul de mai jos:



În unele cazuri, dezintegrarea β^- a unui fragment conduce la stări excitate ale nucleului-lăcă, cu energie de excitare mai mare decât energia de legătură a unui neutron în acest nucleu. În aceste cazuri, se produce emisia de „neutroni întârziați” (relația 13.3.4 - ramura de sus). Neutronii întârziați reprezintă sub 1 % din numărul total de neutroni emiși la fisiunea nucleară. Momentul emisiei neutronului întârziat este condiționat de perioadele de înjumătățire ale dezintegrărilor β^- ce au loc în lanț până la emisia neutronului. De regulă, el variază între fracțiuni de secundă și minute. Energiile neutronilor întârziați sunt cuprinse între $0,25 \div 0,62$ MeV.

La fisiunile cu neutroni termici a ^{235}U , ^{235}U și ^{239}Pu , apar șase grupe de neutroni întârziați care se caracterizează prin perioadele de înjumătățire de 55; 22; 6; 2; 0,5 și 0,2 s, iar elementele produse de fisiune ai căror izotopi emit neutroni întârziați sunt Br, I, Rb, Cs, Kr, Xe, As, Sb, Y, Sn, Se, Tl.

Cele două fragmente de fisiune cu mase apropiate nu rămân în sistem (probă) sub formă de nuclee, fără înveliș electronic. În timpul opririi lor în material ele captează electroni formând structuri ionice sau atomice. Structurile nou apărute au fost numite „produse de fisiune” și corespund unor elemente chimice din zona de mijloc a sistemului periodic.

Într-o primă fază, prin fisiunea nucleelor dintr-o probă de ^{235}U (sau din altă specie nucleară fisionabilă) rezultă circa 60 de specii nucleare β^- radioactive sau produse de fisiune primare.

Pornind de la acestea, prin dezintegrări β^- succesive, se ajunge ca, inițial, în proba respectivă să existe un amestec de circa 180 specii nucleare (în marea lor majoritate, radioactive) numite produse de fisiune secundare, cu $Z \in (30 \div 65)$ și $A \in (72 \div 161)$.

Randamentul de fisiune al unui radionuclid reprezintă proporția în care apare nuclidul respectiv în amestecul produselor de fisiune rezultate, dar și procentul din numărul total de fisiuni, care conduce la obținerea nuclidului dat. Randamentul de fisiune este definit în două variante:

- „randament primar” - se referă numai la produsele de fisiune primare;
- „randament cumulativ” - se referă la ansamblul nuclizilor (produse primare și secundare) existenți la un moment dat în sistem (probă).

Randamentul de fisiune pentru cei circa 180 de nuclizi rezultați în final în sistemul dat este cuprins între 10^{-6} % și 7 %. Suma randamentelor de producere a tuturor produselor de

fisiune este de 200 %, deoarece în fiecare act de fisiune binară rezultă totdeauna două fragmente (contribuția fisiunilor ternare este cu trei ordine de mărime mai mică !)

În fig. 13.7 este reprezentată o curbă experimentală care arată dependența randamentelor produselor de fisiune ale ^{235}U de numărul lor de masă.

Curba are două maxime în zonele cu număr de masă A al fragmentelor cuprinse între $85 \div 105$ la primul maxim și între $130 \div 150$ la al doilea maxim. Din cei 180 de nuclizi, 93 % au numerele de masă cuprinse în cele două intervale menționate.

Randamentul de producere a fisiunii strict simetrice este de numai 0,01 %.

Printre produsele de fisiune ușoare (zona primului maxim) există: $^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{95}_{40}\text{Zr}$, etc., iar în zona produselor de fisiune grele: $^{131}_{53}\text{I}$, $^{133}_{54}\text{Xe}$, $^{137}_{55}\text{Cs}$, $^{140}_{56}\text{Ba}$, $^{140}_{57}\text{La}$. În zona minimului se formează produsele: $^{115}_{48}\text{Cd}$, $^{117}_{46}\text{Pd}$, $^{117}_{49}\text{In}$, etc.

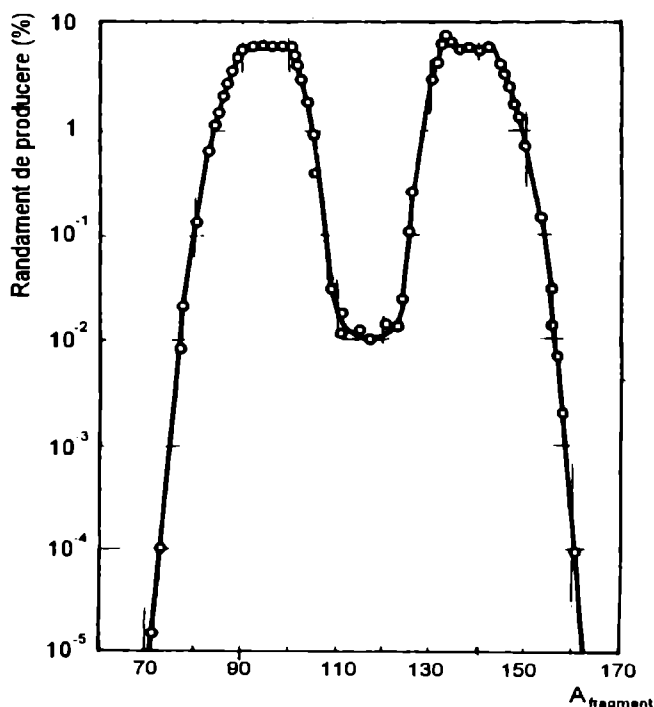


Figura 13.7: Dependența randamentelor produselor de fisiune ale ^{235}U de numărul lor de masă

Curbe similare se obțin atât la fisiunea spontană a nucleelor grele (^{238}U , ^{252}Cf , etc.) cât și la fisiunea cu neutroni termici a nucleelor fisile menționate anterior. S-a observat însă că pe măsură ce numărul Z al nuclidului fisionabil crește, maximul corespunzător produselor de fisiune ușoare se deplasează ușor spre valori mai mari ale lui A , în timp ce maximul corespunzător produselor grele rămâne nedeplasat.

Dacă energia neutronilor incidenți crește, va crește și randamentul de producere a fisiunii simetrice.

În final, dacă se iau în considerație toate produsele care rezultă în urma unui act de fisiune (se includ și particulele și radiațiile emise), energia de fisiune, de cca. 200 MeV, se distribuie astfel:

- | | | |
|---|----------|-------|
| a) Fragmente de fisiune | 167 MeV | |
| b) Neutroni prompti | 5 MeV | |
| c) Radiații γ prompte | 5 MeV | |
| d) Radiații β (e^-) | 5 MeV | |
| e) Radiații γ care acompaniază dezintegrarea β a produselor de fisiune | | 5 MeV |
| f) Neutroni întârziați | 0,01 MeV | |
| g) Antineutrini electronici $\bar{\nu}_e$ | 11 MeV | |

Peste 90% din această energie se propagă în exterior ca energie termică și este utilizată în centralele electrice nucleare.

13.4. FISIUNEA ÎN LANȚ

Reacția de fisiune cu neutroni are o proprietate remarcabilă, aceea de „autoîntreținere” a reacției sau de „reacție în lanț”. La baza acestei proprietăți se află cei $2 \div 3$ neutroni emiși la un act elementar de fisiune, care la rândul lor pot provoca alte fisiuni.

În cazul ideal, în care fiecare din cei doi sau trei neutroni emiși într-o reacție de fisiune cu un neutron inițial produce la rândul său o fisiune, reacția de fisiune în lanț se desfășoară divergent, conform schemei din fig. 13.8, până la epuizarea tuturor nucleelor fisionabile.

Un astfel de caz ideal presupune:

a) dimensiuni infinite ale materialului, pentru ca neutronii să nu se piardă prin suprafețele laterale;

b) în materialul fisionabil să se producă numai reacții de fisiune cu neutroni.

În acest caz, fiecare nouă generație de neutroni se amplifică cu un factor $k_{ideal} = 2$ față de precedenta, astfel că generația a n -a va avea 2^n neutroni.

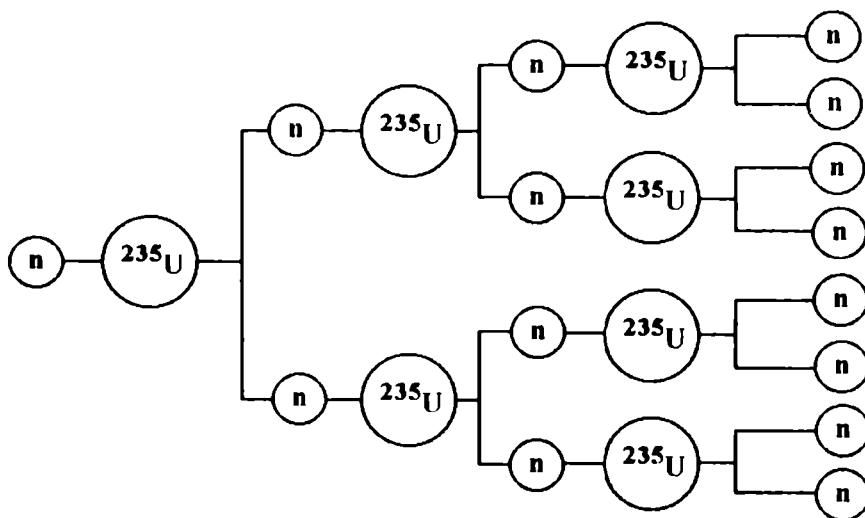


Figura 13.8: Schema unei reacții de fisiune în lanț

În cazurile reale, nici una dintre aceste condiții nu poate fi satisfăcută. În primul rând, probele de material fisionabil au întotdeauna dimensiuni finite și o parte însemnată din neutronii emiși se pierd în afara probei. Apoi, nucleele fisionabile pot da și alte tipuri de reacții cu neutronii, în afara celor de fisiune (ca de exemplu captura radiativă (n, γ)), în urma cărora neutronul își pierde capacitatea de agent de fisiune.

De asemenea, materialul fisionabil are, de regulă, în compoziția sa și alte tipuri de nuclee care pot să absoarbă neutronii prin reacții de tipul (n, γ) , micșorând astfel numărul de neutroni capabili să dea fisiune față de cazul ideal. Pierderile de neutroni pot să ducă în final la stingerea treptată (convergentă) a reacției în lanț inițiată de primul neutron (scăderea numărului de neutroni la fiecare nouă generație).

Și totuși, chiar în cazurile reale se pot realiza condiții pentru desfășurarea reacției în lanț. În plus, se pot realiza condiții pentru o desfășurare „controlată” a acesteia.

Pentru a se putea utiliza energia considerabilă eliberată prin fisiunea nucleelor, se impune într-adevăr realizarea unor sisteme în care fisiunea să se desfășoare controlat în regim divergent, staționar sau convergent, sistem de la care se poate prelua energia termică dezvoltată în zona activă și utiliza în scopuri practice (de exemplu, transformată în energie electrică). Asemenea sisteme se numesc reactoare nucleare.

Factorul de multiplicare (reproducere) k , definit ca raportul dintre numărul de neutroni din generația „ $n + 1$ ” și numărul de neutroni din generația „ n ”, se mai numește și „factor de criticitate” și este o mărime care determină caracterul divergent ($k > 1$), staționar ($k = 1$) sau convergent ($k < 1$) al reacțiilor în lanț care au loc într-un reactor nuclear. Este, deci, o mărime prin care ar putea fi controlat regimul de funcționare al unui reactor. Expresia lui se exprimă prin:

$$k \equiv \frac{N_{n+1}}{N_n} \quad (13.4.1)$$

Factorul de multiplicare k nu va avea niciodată valoarea ideală ($k_{\text{ideal}} = 2$ sau $\bar{k}_{\text{ideal}} = 2,5$ a ^{235}U) datorită pierderilor inevitabile de neutroni într-un sistem real. Totuși, dacă este realizată condiția $k > 1$, chiar cu foarte puțin peste unitate (de exemplu $k = 1,01$), reacția în lanț este autoîntreținută și are caracter divergent, eliberând din ce în ce mai multă energie în unitatea de timp (putere). Pentru a realiza un regim constant de putere se acționează asupra factorului k (este redus la valoarea $k = 1$) printr-o absorbție controlată a unei fracțiuni din neutronii care se produc și care astfel nu mai dau fisiuni.

Pentru stingerea reacției se mărește fracția de neutroni absorbiți astfel încât k devine subunitar.

La pornirea unui reactor nuclear se lucrează în regim divergent ($k > 1$) până la atingerea puterii nominale pentru care a fost proiectat, apoi se trece la regimul staționar de funcționare ($k = 1$). Oprirea reactorului se face trecând la regimul convergent ($k < 1$).

Dacă reacția în lanț nu poate fi controlată și ea decurge numai în regim divergent, se poate ajunge la situația în care într-un interval extrem de scurt, în volumul dat, se eliberează o cantitate extrem de mare de energie și are loc explozia nucleară cu un alai de efecte asupra mediului și a omului.

13.5. REACTOARE NUCLEARE

Orice reactor nuclear de fisiune are în structura sa câteva componente specifice:

❑ *Combustibilul nuclear* - conține izotopi fisionabili cu neutroni termici (^{235}U , ^{239}Pu) sau rapizi (^{238}U , ^{232}Th , ^{241}Pu) care pot fi în stare solidă, lichidă sau gazoasă.

Combustibilul nuclear solid se prepară în diverse variante: sub formă metalică sau ceramică (bioxizi sau carburi de uraniu sau plutoniu), dispersat într-o matrice metalică (magneziu, aluminiu, etc.), sau într-o matrice de oxizi sau carburi de beriliu, zirconiu, etc.

Probele mici (de ordinul centimetrului) de combustibil solid sunt introduse în teci metalice (zirconiu, aluminiu) sau de aliaje (zircaloy, oțel), alcătuind așa-numitele „bare de combustibil” sau de ardere. Un sistem care fixează împreună câteva bare de combustibil formează un „element combustibil”. Pe lângă materialul fisil, în barele de combustibil se afla și material fertil, care poate să producă în paralel noi rezerve de materiale fisile.

Combustibilul nuclear poate fi îmbogățit în izotopul fisionabil, ajungându-se la concentrații mai mari decât cele din amestecul natural. De exemplu, uraniul natural este îmbogățit în ^{235}U , folosindu-se o tehnologie foarte complexă, cu implicații asupra radioactivității mediului.

❑ *Moderatorul* - este componenta care realizează termalizarea neutronilor prin ciocniri elastice. Ca moderatori servesc substanțe lichide sau solide care conțin atomi ușori și au secțiune mică de captură a neutronilor, ca de exemplu: apa grea, apa ușoară, hidruri metalice, grafit, beriliu, etc.

❑ *Materiale reflectoare pentru neutroni* - se plasează în jurul zonei active cu rolul de a întoarce în zona activă acei neutroni care au părăsit-o. Reflectori buni sunt grafitul și oxidul de beriliu pentru neutronii termici și bariul, bismutul, plumbul, etc. pentru neutronii rapizi.

❑ *Fluidul de răcire (agentul termic)* - care circulă prin zona activă și preia căldura dezvoltată în miezul reactorului, transportând-o în exterior, după care o transferă unui circuit exterior cu apă care se încălzește până la evaporare. Ca agenți termici de răcire sunt folosite lichide (apa, apa grea, lichide organice, metale sau săruri topite - sodiu, litiu, fluoruri de Na + Be, fluoruri de Na + Li - etc.) sau gaze (heliu, dioxid de carbon, azot, aer, etc.).

Pentru ca pierderile de neutroni să fie minime, și deci randamentul de producere a energiei cât mai mare, se impune ca toate materialele din zona activă (tecile, moderatorul, reflectorul, agentul de răcire) - cu excepția materialului fisionabil - să conțină atomi (nuclee) cu secțiuni mici de captură pentru neutroni. De asemenea, ele trebuie să reziste la solicitări mecanice și termice, la coroziuni chimice, la iradierii, și să aibă o bună conductibilitate termică.

❑ *Barele de reglare și control* - prin care se reglează factorul de criticitate k , se fac din materiale care au secțiune mare de captură pentru neutroni: bor, cadmiu, indiu, argint, etc. Aceste bare se introduc mai mult sau mai puțin în zona activă (automat), controlând astfel fluxul de neutroni.

❑ *Blindajul de protecție biologică* - conține pereți și ecrane de beton, plumb, oțel, care să asigure protecție contra radiațiilor β și γ emise de fragmentele de fisiune și de toate materialele din zona activă, care se activează datorită iradierii cu neutroni (n , γ). De asemenea, se folosesc ecrane din parafină sau apă pentru protecția contra neutronilor.

Reactoarele nucleare construite sunt foarte variate și sunt clasificate după diverse criterii.

○ După destinația lor, există următoarele tipuri de reactoare:

- Reactoare de cercetare - pentru studiul diferitelor reacții nucleare produse de neutroni, al efectului iradierii cu neutroni asupra proprietăților fizice, chimice, mecanice, etc. ale materialelor și pentru producerea de izotopi radioactivi artificiali. De regulă, aceste reactoare au putere mică.

- Reactoare energetice - destinate producerii de energie în centralele nucleare electrice. Sunt reactoare de putere mare.

- Reactoare reproducătoare (breeder) - alături de fisiune, se iradiază cu neutroni izotopi fertili pentru producerea de noi materiale fisile ce vor fi separate și utilizate drept combustibili nucleari.

- Reactoare destinate producerii de elemente supragrele.

- Reactoarele de putere folosite în centralele nucleare electrice se pot clasifica după tipul de moderator și după tipul de agent termic (răcire):

- Reactoare cu răcire cu gaz (cu mai multe variante);

- Reactoare cu apă ușoară - cu variantele:

PWR (Pressurized Water Reactor) - reactor cu apă sub presiune;

BWR (Boiling Water Reactor) - reactor cu apă în fierbere.

- Reactoare cu apă grea:

PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor) - reactor cu apă grea sub presiune (de tipul reactorului CANDU);.

- Reactoare reproducătoare (cu mai multe variante).

- După tipul de combustibil, există:

- Reactoare cu uraniu natural;

- Reactoare cu uraniu îmbogățit în izotopul ^{235}U ; etc.

- După energia neutronilor care produc fisiunea, reactoarele pot fi:

- Reactoare cu neutroni termici;

- Reactoare cu neutroni rapizi.

Reactoarele care ridică cele mai mari probleme din punct de vedere ecologic sunt reactoarele de putere, utilizate în centralele nucleare electrice, datorită cantității mai mari de combustibil nuclear care intră în circuitul combustibilului nuclear cu toate consecințele care decurg de aici.

13.6. FACTORUL DE CRITICITATE AL UNUI REACTOR CU URANIU NATURAL. CONTROLUL REACTORULUI

În fig. 13.9 este prezentată schematic secțiunea longitudinală a zonei active a unui reactor nuclear cu uraniu natural și moderator de grafit și un agent de răcire care circulă în zona elementelor combustibile și a moderatorului.

Barele de control din cadmiu sunt figurate în două poziții:

a) ambele bare sunt complet ridicate pentru a nu bara drumul neutronilor termici spre elementul combustibil;

b) o bară îmbracă parțial un element combustibil reducând drastic numărul de neutroni termici care ajung la barele de uraniu din acest element.

Carcasa reactorului este de forma unui tanc rezistent la presiuni mari. În jurul reactorului este figurat sistemul ecranelor de protecție.

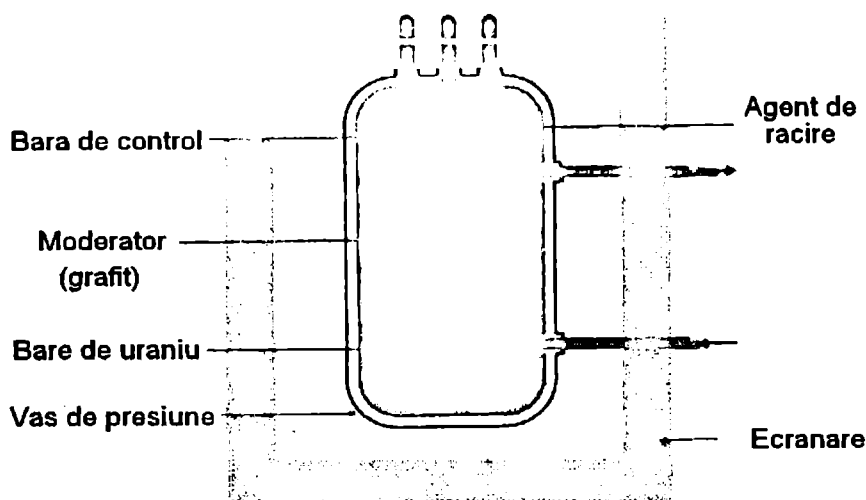


Figura 13.9: Secțiune longitudinală a zonei active a unui reactor nuclear cu uraniu natural și moderator de grafit

Factorul de criticitate (sau de multiplicare) al unui astfel de reactor depinde de soarta pe care o poate avea un neutron rapid din momentul emisiiei sale într-un act de fisiune, până în momentul dispariției sale ca particulă liberă. În fig. 13.10 este reprezentată schema șanselor unui astfel de neutron rapid, care ne permite evaluarea factorului de criticitate.

Un neutron rapid, produs în bara combustibilă de uraniu natural poate, cu o anumită probabilitate, să producă fisiunea unui nucleu de uraniu (^{235}U sau ^{238}U), multiplicând numărul neutronilor rapizi cu un factor ϵ . Cei ϵ neutroni rapizi ajung în moderator unde începe procesul de încetinire spre energiile de rezonanță ale ^{238}U și, în final, spre termalizarea lor ($\sim 0,025$ eV).

Din cei ϵ neutroni rapizi, fracțiunea $\epsilon(1 - P_r)$ scapă, părăsesc sistemul (zona activă). Restul de ϵP_r neutroni rapizi sunt încetiniți până în zona de energii $6,68 \div 418$ eV unde nucleele de ^{238}U pot captura rezonant neutronii, proces care are secțiunea eficace foarte mare, de $10^3 \div 10^4$ barni. Fracțiunea $(1 - p)\epsilon P_r$ sunt absorbiți rezonant și părăsesc ciclul neutronilor care vor fisiona. Acestui fenomen îi supraviețuiesc $p \epsilon P_r$ neutroni care, mai departe, sunt încetiniți până devin neutroni termici. Probabilitatea „ p ” se numește probabilitatea evitării absorbției de rezonanță.

O fracțiune $(1 - P_t)$ din neutronii termici scapă din sistem datorită difuziei. Rămân $\epsilon p P_r (1 - P_t)$ neutroni termici, din care $\epsilon p P_r P_t$ neutroni dau interacții de captură și de fisiune cu uraniul, iar $(1 - f) \epsilon p P_r P_t$ neutroni dau reacții de captură (n, γ) cu celelalte materiale din zona activă (moderatorul, agentul de răcire, tecile, combustibilul, etc.) și părăsesc ciclul. Factorul „ f ” se numește „factor de utilizare termică”.

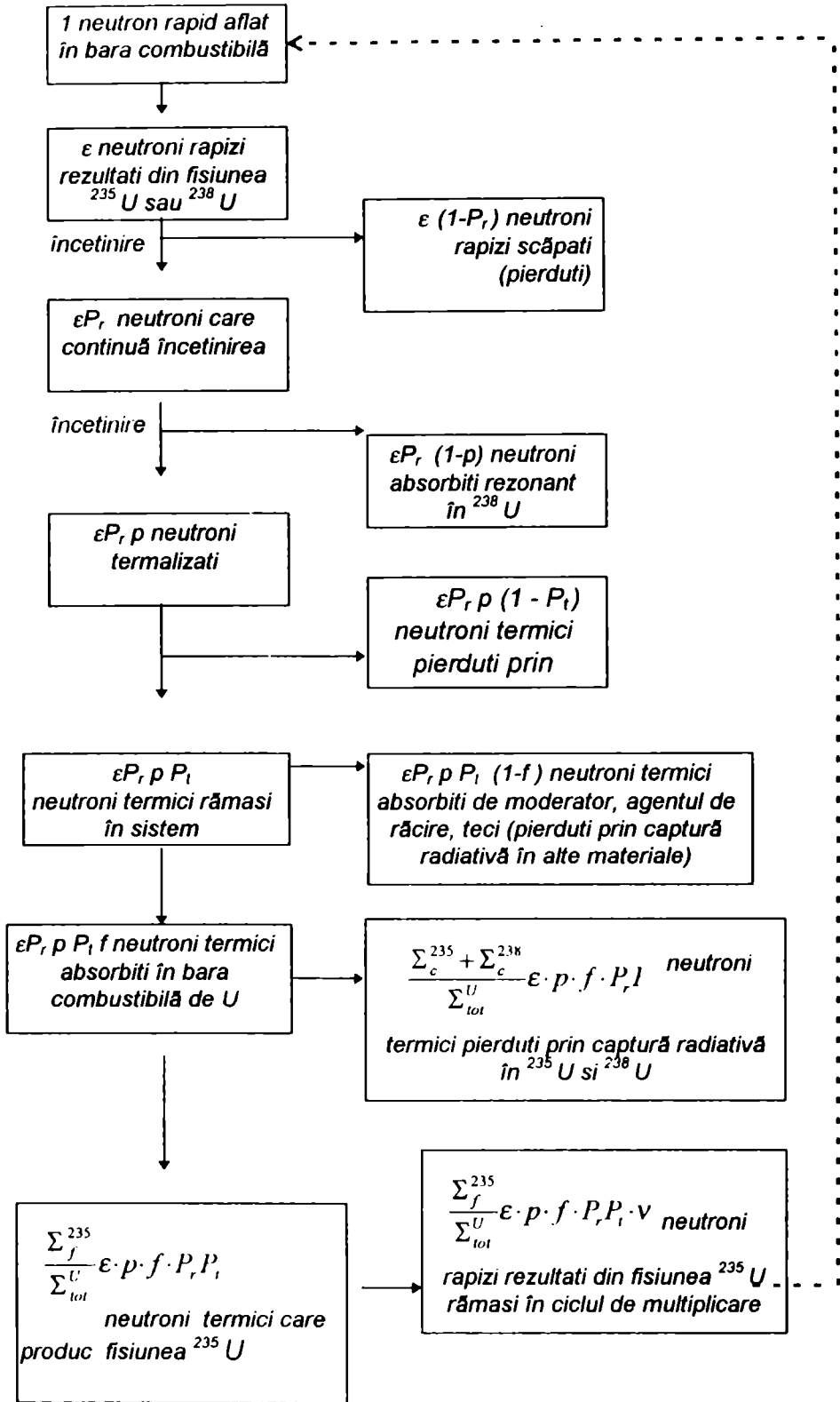


Figura 13.10: Ciclul de multiplicare a neutronilor într-un reactor de fisiune cu uraniu natural

Probabilitatea ca un neutron termic absorbit în uraniu să producă fisiunea nucleului ^{235}U este dată de raportul dintre secțiunea macroscopică de fisiune \sum_f^{235} a ^{235}U și secțiunea totală de interacție $\sum_{\text{tot}}^{\text{U}}$ a neutronului termic cu ^{235}U (captură \sum_c^{235} , fisiune \sum_f^{235}) și cu ^{238}U (captură \sum_c^{238}):

$$\sum_{\text{tot}}^{\text{U}} = \sum_c^{235} + \sum_f^{235} + \sum_c^{238} \quad (13.6.1)$$

și

$$p_{\text{fis}} = \frac{\sum_f^{235}}{\sum_{\text{tot}}^{\text{U}}} \quad (13.6.2)$$

Astfel, fracțiunea:

$$(1 - p_{\text{fis}}) = \frac{\sum_c^{235} + \sum_c^{238}}{\sum_{\text{tot}}^{\text{U}}} \quad (13.6.3)$$

din neutronii absorbiți în uraniu dau captură radiativă (n, γ) și un număr de neutroni egal cu

$$\epsilon p_f p_r p_t \frac{\sum_c^{235} + \sum_c^{238}}{\sum_{\text{tot}}^{\text{U}}} \text{ părăsesc ciclul de multiplicare al neutronilor.}$$

Numărul de neutroni rezultați într-o fisiune a ^{235}U este ν și deci în final rezultă un număr de neutroni egal cu coeficientul efectiv k_{ef} de criticitate:

$$k_{\text{ef}} = \epsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \cdot P_r \cdot P_t \quad (13.6.4)$$

unde η este randamentul de producere de neutroni rapizi la absorbția unui neutron termic în uraniu natural:

$$\eta = \nu \cdot \frac{\sum_f^{235}}{\sum_{\text{tot}}^{\text{U}}} \quad (13.6.5)$$

sau

$$\eta = \nu \cdot \frac{N^{235} \sigma_f^{235}}{\sigma_c^{235} + \sigma_c^{238} + \frac{N^{235}}{N^{238}} \sigma_f^{235}} \quad (13.6.6)$$

unde σ_c și σ_f sunt secțiunile microscopice de captură și de fisiune, iar N^{235} și N^{238} sunt concentrațiile pentru ^{235}U și ^{238}U .

Dacă se notează:

$$k_{\infty} = \epsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \quad (13.6.7)$$

factorul de multiplicare al unui sistem combustibil + moderator de dimensiuni infinite, în care

$P_r = P_t = 1$, atunci:

$$k_{ef} = k_{\infty} \cdot P_r \cdot P_t < k_{\infty} \quad (13.6.8)$$

Relația (13.6.7) este numită „formula celor patru factori”, iar relația (13.6.4) este cunoscută și sub denumirea de „formula celor șase factori”.

Factorul η depinde numai de proprietățile fizico-chimice ale combustibilului nuclear utilizat, factorul ϵ depinde în plus și de modul de aranjare în reactor a acestui material. De regulă, $\eta > 2$, în timp ce ϵ este un pic mai mare decât unitatea.

În funcție de valoarea lui k_{ef} , reacția în lanț se poate desfășura în trei regimuri diferite:

- a) $k_{ef} < 1$ regim subcritic, reacție în lanț convergentă;
- b) $k_{ef} = 1$ regim critic - staționar, reacție autoîntreținută;
- c) $k_{ef} > 1$ regim supracritic, reacție în lanț divergentă, caracter exploziv.

Relațiile (13.6.7) și (13.6.4) au fost stabilite în ipoteza că toți neutronii dintr-o generație sunt prompti. Timpul mediu de viață al neutronilor prompti în reactor este $\tau_p = 10^{-5}$ s. Evoluția în timp a numărului de neutroni este dată de ecuația:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_{n+1} - N_n}{\tau} = \frac{k_{ef} - 1}{\tau} N \quad (13.6.9)$$

și, deci:

$$N = N_0 \cdot \exp\left[(k_{ef} - 1) \cdot \frac{t}{\tau}\right] \quad (13.6.10)$$

Pentru $k_{ef} = 1,005$ și $\tau = 10^{-5}$ s, după o secundă numărul de neutroni crește de 150 de ori. Un astfel de reactor ar putea fi controlat dacă operația mecanică de introducere a barelor de control în zona activă pentru micșorarea fluxului de neutroni s-ar putea realiza într-un timp $t < 10^{-3}$ s. În practică, așa ceva este imposibil !

Și totuși, controlul reactorului este posibil deoarece o generație de neutroni este formată din neutronii prompti plus neutronii întârziați emiși de fragmentele de fisiune. Există mai multe grupe de neutroni întârziați emiși până într-un minut după actul de sciziune.

În tabelul 13.3 sunt date perioadele de înjumătățire $T_{1/2}$ ale izotopilor (fragmente) care îi emit prin dezintegrare β și procentul q de neutroni din numărul total de neutroni care sunt emiși cu această întârziere.

Tabelul 13.3: Perioadele de înjumătățire ale fragmentelor care emit neutroni după o dezintegrare beta și procentul de neutroni care sunt emiși cu întârziere (din numărul total de neutroni rezultați la o fisiune)

$T_{1/2}$ (s)	q (%)
55,7	0,021
22,7	0,140
6,2	0,125
2,3	0,253
0,6	0,074
0,2	0,027
Total	0,64

Dacă se ține cont de acești neutroni, alături de cei prompti, timpul mediu de viață al unei generații de neutroni este $\bar{\tau} \cong 10^{-1}$ s

$$(\bar{\tau} = \sum_i q_i \cdot \tau_i) \quad (13.6.11)$$

În aceste condiții, coeficientul de multiplicare va fi format din doi termeni, corespunzători contribuției neutronilor prompti și a celor întârziați:

$$k_{ef} = k_{ef}^{pr} + k_{ef}^{int} \equiv (1 - \beta) \cdot k_{ef} + \beta \cdot k_{ef} \quad (13.6.12)$$

unde β este ponderea neutronilor întârziați.

Dacă $k_{ef} = 1,005$ și $\tau = 10^{-1}$ s, numărul de neutroni crește într-o secundă numai de 1,5 ori. Creșterea lentă a intensității reacției în lanț permite controlul relativ simplu al procesului ei de desfășurare.

În concluzie, observăm că fenomenul de fisiune nucleară stă la baza multor aplicații, cum sunt:

- a) producerea de izotopi radioactivi artificiali (IRA) care sunt utilizați pe scară largă în diverse domenii de activitate;
- b) producerea de energie nucleară în centrale nucleare electrice;
- c) surse de energie pentru propulsarea navelor (cosmice sau marine);
- d) aplicații militare (bombe);
- etc.

Toate aceste aplicații pot avea un impact mai mic sau mai mare asupra radioactivității mediului, după cum se va vedea în continuare.

CAPITOLUL 14

ENERGETICA NUCLEARĂ ȘI MEDIUL. CICLUL COMBUSTIBILULUI NUCLEAR

Centralele nucleare electrice (CNE) reprezintă la ora actuală sursa alternativă capabilă să satisfacă nevoile de energie ale populației planetei pentru secolul viitor, în condițiile în care rezervele de combustibili clasici dau semne tot mai clare de epuizare.

La sfârșitul anului 1997 existau în lume 442 CNE care furnizau 350 GWe, adică peste 15 % din puterea electrică generată de toate tipurile de centrale electrice. Repartizarea lor pe țări este dată în tabelul 14.1.

*Tabelul 14.1: Repartizarea centralelor nucleare electrice pe glob
(1997) (ref.[47])*

Tara	Nr. CNE	Putere totală (MWe)
Argentina	2	935
Armenia	1	376
Anglia	35	12.928
Africa de Sud	2	1.842
Belgia	7	5.712
Brazilia	1	626
Bulgaria	6	3.538
China	3	2.167
Rep.Cehă	4	1.648
Coreea	11	9.120
Elveția	5	3.078
Finlanda	4	2.355
Franța	57	59.948
Germania	20	22.282
India	10	1.695
Japonia	53	42.335
Kazahstan	1	70
Lituania	2	2.370

Mexic	2	1.308
Olanda	2	504
Pakistan	1	125
Romania	1	650
Rusia	29	19.843
Rep.Slovacă	4	1.632
Slovenia	1	632
Spania	9	7.207
Suedia	12	10.040
SUA	110	100.579
Ucraina	16	13.765
Ungaria	4	1729

Practic, la fiecare cinci ani s-a dublat puterea generată de CNE. Se estimează însă că acest ritm nu se va păstra. Spre sfârșitul mileniului, puterea totală generată de CNE va fi de $720 \div 950$ GW (în loc de 1760 GW cât ar fi ajuns în ritmul de dublare la fiecare cinci ani !).

Această temporizare a ritmului de producere a energiei electrice în CNE este cauzată, pe de o parte, de o temporizare a creșterii economice și de instituirea unor măsuri pentru economisirea energiei electrice, iar pe de altă parte, temporizarea este determinată și de opoziția opiniei publice mondiale față de construirea de noi CNE, posibile surse de poluare radioactivă și de iradiere a populației.

Întreprinderile industriale cu profil nuclear pot fi grupate în două categorii:

□ întreprinderi în care se lucrează cu material radioactiv cu activitate specifică mică, și anume acelea care au de-a face cu elemente metalice fisionabile (deci cu izotopi radioactivi naturali);

□ întreprinderi în care se lucrează cu materiale radioactive cu activitate specifică mare, adică acelea care au de-a face cu izotopi radioactivi artificiali, rezultați din fisiunea nucleară sau din activarea cu neutroni a diferitelor materiale din reactoarele nucleare.

De fapt, centrala electrică nucleară (CNE) reprezintă numai o parte a ciclului combustibilului nuclear, care este reprezentat schematic în figura 14.1.

Acest ciclu începe cu obținerea minereului de uraniu și îmbogățirea lui în ^{235}U . Urmează etapa de preparare propriu-zisă a combustibilului nuclear. După etapa „arderii” în CNE a combustibilului, urmează o etapă de reprocesare a acestui combustibil, în care se recuperează uraniul nears, plutoniul generat și alți izotopi radioactivi necesari în diferite aplicații. În final, urmează depozitarea deșeurilor radioactive. În fiecare din aceste etape a ciclului combustibilului nuclear sunt eliberate în mediu substanțe radioactive care contribuie la creșterea iradierii populației.

În general, este greu și complicat de estimat dozele suplimentare pe care le încorporează populația datorită CNE. Ce se poate spune sigur este că doza de iradiere datorată unei CNE depinde de distanță și timp: scade când distanța CNE față de localitatea populată crește și crește când timpul de funcționare al CNE crește.

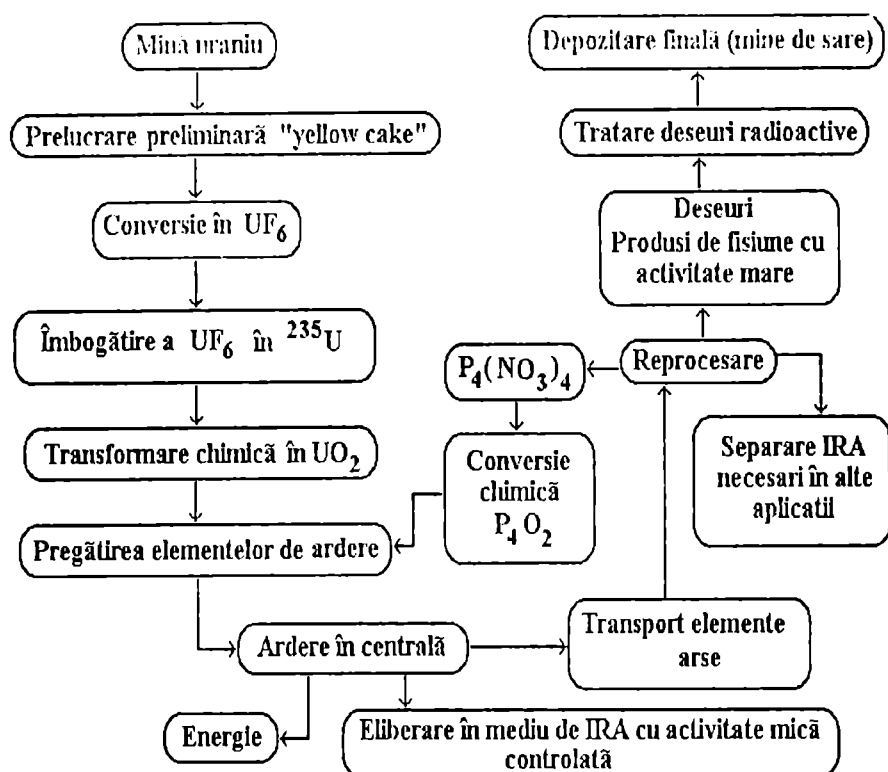


Figura 14.1: Ciclul combustibilului nuclear (CCN)

Orice CNE eliberează în mediu o serie întreagă de izotopi radioactivi care au diferite perioade de înjumătățire $T_{1/2}$. Majoritatea acestor radionuclizi se dezintegrează rapid și de aceea sunt importanți numai pentru zona locală. Totuși, se pot elibera în mediu izotopi radioactivi cu $T_{1/2}$ foarte mare, care se pot răspândi pe tot globul, unii mai repede, alții mai încet, și pot să rămână în mediu un timp extrem de lung.

În prezent, tendința generală este în sensul reducerii drastice a cantității de izotopi radioactivi eliberați în mediu, chiar în condițiile creșterii puterii CNE, prin introducerea unor măsuri de securitate nucleară foarte severe.

14.2. EXPLOATAREA ȘI PRELUCRAREA PRELIMINARĂ A MINEREULUI DE URANIU

Uraniul este un element chimic care are o reactivitate relativ mare. Acest fapt a făcut ca în decursul erelor geologice să se disperseze practic în toată scoarța terestră, sub forma diferitelor combinații chimice, cum ar fi: oxizi, hidrați, carbonați, fosfați, silicați, vanadați, titanați, etc. numite minerale de uraniu. În medie, elementul uraniu are o concentrație de 2,7 ppm în scoarța terestră. Zăcămintele uranifere în care elementul uraniu să se găsească în concentrații de 0,03 ÷ 0,5 % sunt puține pe glob (Canada, SUA, fosta URSS, Franța, România, Africa de Sud, etc.).

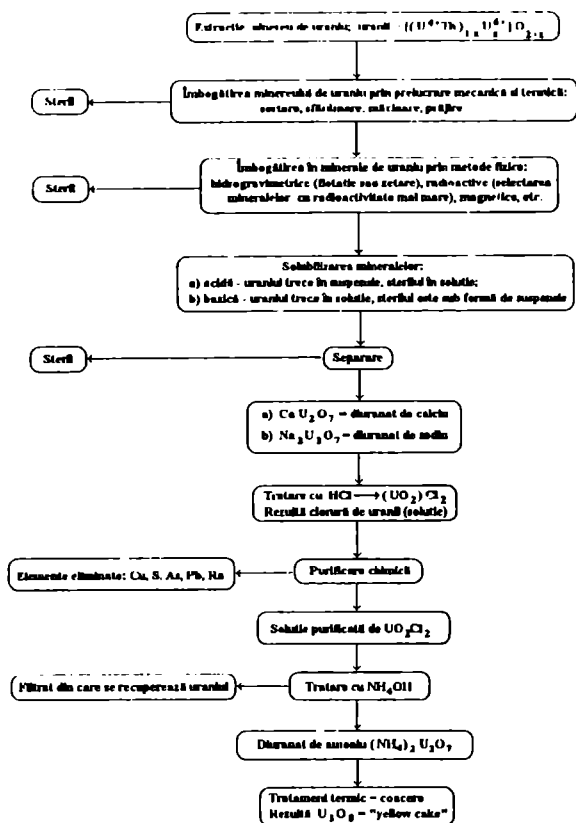


Figura 14.2: Etapele principale în tratarea unui minereu de uraniu pentru obținerea produsului comercial „yellow cake”

Minereurile de uraniu care conțin minerale de uraniu se găsesc în proporție de 65 % sub formă de roci magmatice (bazalt, granit), 25% în roci sedimentare și 10 % în roci filoniene (pegmatit, duonit, etc.).

Din cantitatea totală de uraniu care există pe glob ($\sim 4 \cdot 10^{13}$ tone), circa 2/3 se află pe uscat (în scoarța terestră și o foarte mică fracție în zăcămintele de petrol), iar 1/3 se află în apa mărilor și a oceanelor (sub 0,002 ppm).

În prezent, exploatarea minieră se fac numai pe uscat - în subsol sau la suprafață - și numai în acele zăcămintele uranifere unde concentrația uraniului este de cel puțin 0,03 % din motive legate de eficiența economică. Pentru reducerea cheltuielilor de producție și transport, minereul de uraniu suferă o prelucrare preliminară în vecinătatea minelor de uraniu, până la obținerea unui concentrat galben de uraniu, numit „yellow cake” care este un amestec de uranați și diuranați sau oxizi care conțin elementul uraniu în concentrații de 70 ÷ 75 %. Acest concentrat este varianta comercială din care se prepară apoi combustibilul nuclear propriu-zis. Există două procedee mai frecvent utilizate pentru obținerea acestui produs prin tratarea minereului de uraniu. În figura 14.2. sunt reprezentate schematic principalele etape în cazul unuia din procedee. Pentru a se evalua conținutul real de uraniu în diferiții produși de tip „yellow cake”, s-a ales ca bază cantitatea de U_3O_8 care ar rezulta din transformarea compuşilor respectivi în acest oxid mixt al uraniului. La livrare, produsul „yellow cake” trebuie să conțină uraniu în proporție de minim 60 %, umiditatea să fie sub 10 % din greutatea concentratului de uraniu, iar forma de prezentare să fie pudră sau granule.

Impuritățile acceptate în „yellow cake”, exprimate în procente din U_3O_8 , sunt: vanadiu 1 %, fosfor 6 %, bor 0,2 %, arsen 2 %, molibden 0,6 %, siliciu 4 %, sulfat 10 %, carbonat 2 %, halogeni 0,5 %, etc.

Activitatea specifică a materialelor este mică dar, datorită cantităților mari de substanță radioactivă vehiculată, se pot produce iradiieri a căror intensitate este suficientă pentru lezarea organismului uman, dacă contactul direct cu aceste substanțe este de lungă durată.

În procesul de uscare, sfărâmare, măcinare, cernere și ambalare a minereului se formează praf radioactiv și radon rezultat din dezintegrarea radiului, care sunt inhalate și produc iradiere internă.

Menținerea concentrației de aerosoli radioactivi la un nivel nepericulos se realizează prin folosirea unor sisteme de ventilare și de purificare a aerului.

De asemenea, apele utilizate în procesele tehnologice poartă urme de substanță radioactivă în concentrații peste normal și ele trebuie tratate, filtrate și aduse la concentrații radioactive admise, înainte de a fi deversate în cursurile de ape din apropiere.

14.3. FABRICAREA COMBUSTIBILULUI NUCLEAR

De la „yellow cake” la combustibilul propriu-zis, materialul radioactiv este supus unei serii de prelucrări și transformări chimice și fizice din care să rezulte în final pastilele de UO_2 , îmbogățite sau nu în ^{235}U .

Ciclul combustibilului nuclear prezentat în fig. 14.1 cuprinde câteva etape în care, de la „yellow cake” se ajunge la pastilele de UO_2 care formează combustibilul nuclear propriu-zis. Acestea sunt:

☐ Conversia chimică de la „yellow cake” la hexafluorura de uraniu;

☐ Separarea izotopică (îmbogățirea în ^{235}U) prin metoda difuziei gazelor $^{235}UF_6$ și $^{238}UF_6$ prin filtre poroase. Viteza de curgere a $^{235}UF_6$ este ceva mai mare decât a $^{238}UF_6$, astfel că gazul care a trecut prin filtrele poroase este mai bogat în $^{235}UF_6$ decât cel care a fost supus difuziei. Amestecul $^{235}UF_6 + ^{238}UF_6$ este supus unor treceri repetate prin aceste filtre până se obține concentrația dorită a ^{235}U .

☐ Conversia chimică a UF_6 în UO_2 ;

☐ Conversia mecanică și termică în pastile. Bioxidul de uraniu rezultă sub formă de pulbere de culoare cenușiu închis, cu densitatea $\rho = 3500 \text{ kg/m}^3$. Din această pulbere se prepară prin presare în matrițe (30 ÷ 50 bar) tablete cilindrice (pastile) de UO_2 cu $\rho = 5500 \text{ kg/m}^3$ cu $h / \Phi = 1 : 4$. Aceste pastile sunt tratate termic (sinterizate) timp de 2 ÷ 3 ore la 1700°C , densitatea lor crescând astfel până la $10.000 \div 11.00 \text{ kg/m}^3$. În final, pastilele sunt șlefuite mecanic. La fiecare nou lot de pastile se verifică conținutul de uraniu, gradul de puritate și de umiditate, raportul oxigen / uraniu, dimensiunile geometrice, densitatea și structura microcristalină, după care sunt transmise la instalația de fabricare a barelor și elementelor de ardere.

Urmează etapa de „întecuire” a pastilelor de UO_2 în tuburi (teci) de zircaloy, operație complexă și delicată.

În afara pastilelor de UO_2 , în fiecare tub se introduc și așa-zisele elemente structurale ale barei de ardere: un resort care menține pastilele de UO_2 la un loc prin presare, un tub distanțier și o tabletă izolatoare (fig. 14.3). Tubul este umplut cu heliu la o presiune de 20 ± 30 bar, care are dublu rol:

- îmbunătățește transferul de căldură de la pastilele de UO_2 la teaca de zircaloy;

- compensează parțial presiunea exercitată din exterior de agentul de răcire asupra pereților tubului.

Tubul distanțier din interiorul fiecărei bare de combustibil are, de asemenea, două roluri:

- rezervă o parte din volumul barei pentru colectarea produselor de fisiune gazoase și volatile care rezultă în timpul „arderii” (reacție în lanț);

- susține teaca de zircaloy în timpul solicitărilor mecanice și termice la care este supusă.

Din câteva bare de ardere se assemblează un element de ardere. Se montează un schelet metalic format din plăci distanțiere, tuburi de ghidare a barelor de reglare și control a reacției în lanț, un cap și un picior de susținere al elementului de ardere (fig. 14.3).

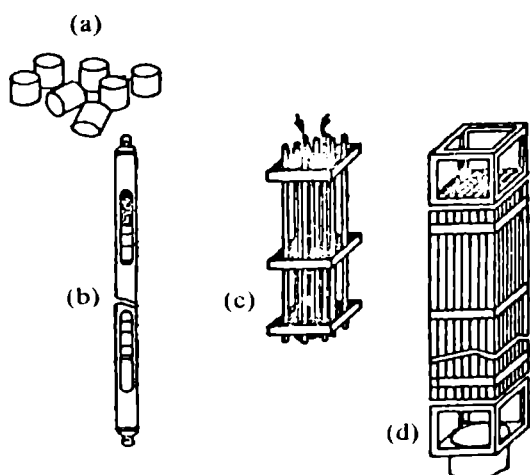
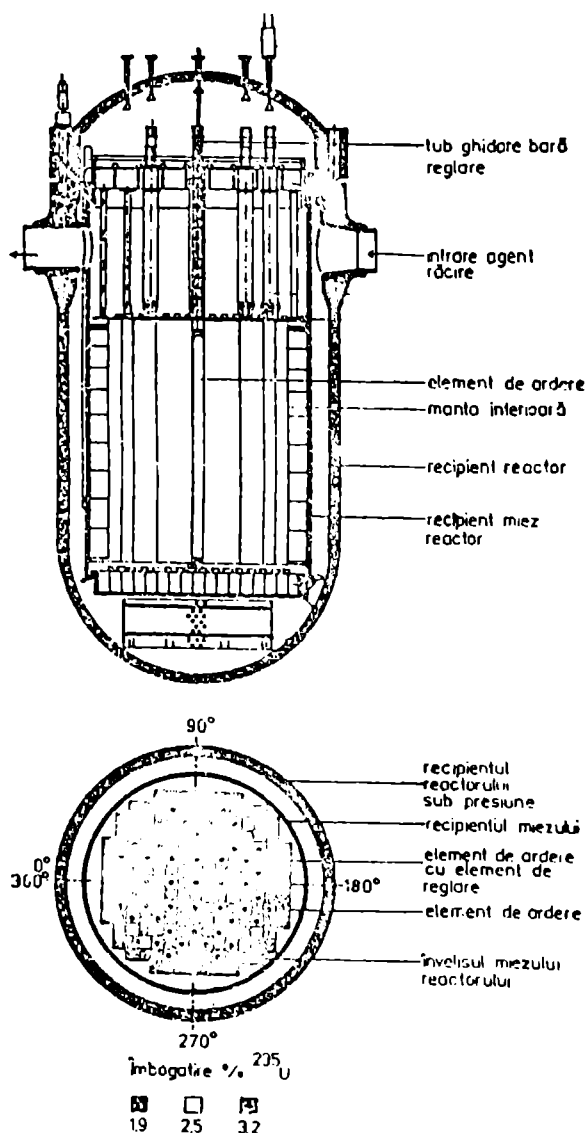


Figura 14.3: Componente ale unui element de ardere: a) pastile de UO_2 ; b) bare combustibile; c) element de ardere; d) element de ardere cu piesele de susținere (picior și cap).

În fig. 14.4 este prezentat schematic un reactor energetic de tip PWR și așezarea elementelor de ardere în incinta sa. Agentul de răcire circulă liber printre elementele de ardere.

În cazul reactorului de tip CANDU pastilele de UO_2 conțin uraniu natural, iar moderatorul este apa grea. Neutronii termici sunt mult mai slab absorbiți (n , γ) în apa grea decât în apa obișnuită (ușoară) și, de aceea, pentru autoîntreținerea reacției de fisiune în lanț, sunt suficiente nucleele de ^{235}U (din amestecul natural de izotopi ^{235}U și ^{238}U) conținute într-o cantitate totală de UO_2 echivalentă cu masa critică a acestui nuclid fisionabil.

Figura 14.4: Schema unui reactor energetic de tip PWR și așezarea elementelor de ardere în incinta sa.



Barele de ardere și elementele combustibile ale unui reactor de tip CANDU au structuri și aranjamente diferite de ale celor de la un reactor de tip PWR, după cum se va vedea mai departe.

Toate operațiile care fac parte din tehnologia de preparare a combustibilului nuclear înseamnă lucrul cu substanțe radioactive și se impun măsuri speciale de protecție a omului și de păstrare a mediului în norme de radioactivitate admise.

14.4. PRODUCEREA ENERGIEI ELECTRICE. CENTRALE NUCLEARE ELECTRICE DE TIP PWR

O centrală nucleară electrică (CNE) funcționează pe același principiu ca și o centrală termoelectrică clasică (CTE), cu diferența că aici sursa de energie este un reactor nuclear și nu un furnal.

În fig. 14.5. este prezentat principiul de funcționare al unei centrale nucleare electrice de tip PWR. În zona centrală (activă) a reactorului, uraniul fisionează și are loc reacția în lanț autoîntreținută. Energia eliberată prin fisiune se transformă în căldură. Căldura este preluată cu un circuit de răcire (apă sub presiune la PWR), numit circuit primar de apă. Căldura de la circuitul primar este transferată unui circuit secundar, unde energia termică este utilizată pentru producerea de vapori. Vaporii de apă pun în funcțiune o turbină și generatorul propriu-zis de energie electrică. Vaporii trec apoi într-un sistem de condensare și apa rezultată este pompată înapoi în circuitul secundar.

În timpul funcționării normale a unei centrale nucleare electrice se produce „arderea” combustibilului nuclear: nucleele de ^{235}U (sau ^{239}Pu) fisionează sub acțiunea neutronilor termici.

Rezultatul arderii conduce la scăderea cantității de nuclee fisionabile și formarea produșilor de ardere - fragmentele de fisiune care sunt de fapt nuclee radioactive.

După un anumit timp de funcționare a CNE cu o încărcătură dată de elemente combustibile, se constată că reacția în lanț nu se mai autoîntreține un timp indefinit de lung, deși în barele de ardere există încă combustibil nears. Cauza acestui fenomen o constituie prezența produselor de fisiune care acționează distructiv asupra materialelor din interiorul reactorului nuclear și determină absorbția neutronilor din zona activă (neutroni necesari întreținerii reacției în lanț în regim critic staționar).

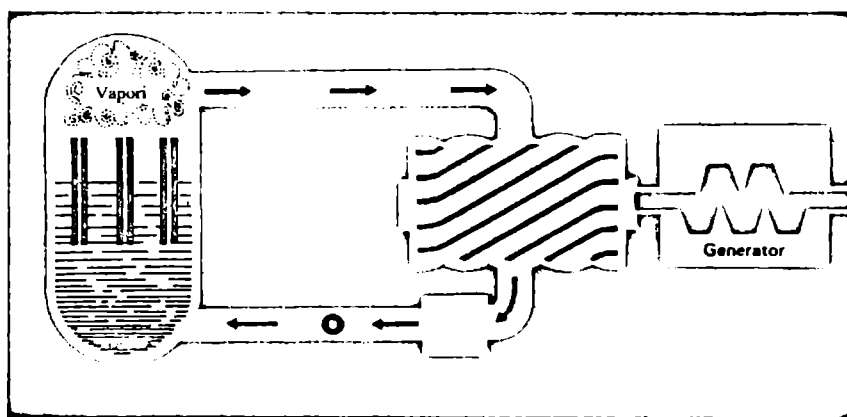


Figura 14.5: Principiul de funcționare al unei CNE de tip PWR

Radiațiile foarte intense β și γ împreună cu neutronii și fragmentele de fisiune produc defecte de rețea în tecile combustibilului: dilatări anormale, creșterea volumului, apariția unor puncte de coroziune - fapt care duce la deteriorarea barelor și a elementelor de ardere.

Unele fragmente de fisiune au secțiune mare de captură pentru neutroni și absorb o fracție importantă din neutronii necesari continuării reacției în lanț (modifică parametrul de criticitate k_e). Fenomenul este numit *otrăvirea reactorului*.

Principalii „agenți de otrăvire” sunt gaze nobile (xenon) și lantanide, în special izotopii care au secțiune mare de captură.

În schema din fig. 14.6 se urmărește dezintegrarea β^- în lanț a unui fragment nuclear - $^{135}_{92}\text{Te}$ rezultat din fisiunea uraniului - și fenomenul concurent de captură (n, γ) a descendenților săi.

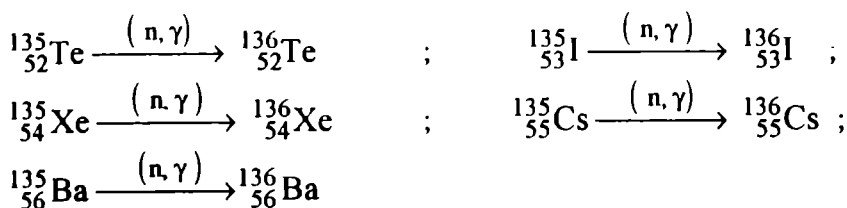
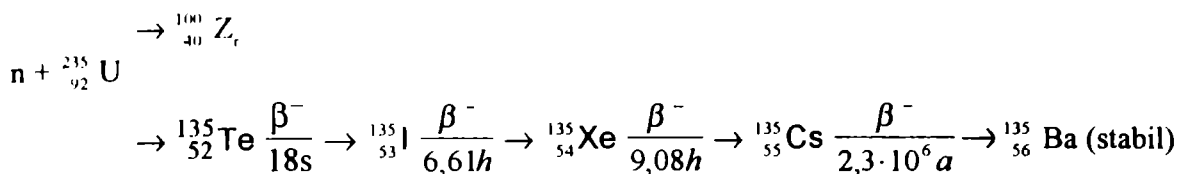


Figura 14.6: Dezintegrarea β^- și captura (n, γ) a izobarilor cu $A=135$

Raportul dintre numărul de nuclee care se dezintegrează β^- și cele care suferă reacții (n, γ) depinde de fluxul de neutroni Φ din reactorul nuclear:

$$\frac{\left(\frac{dn}{dt}\right)_{\beta}}{\left(\frac{dn}{dt}\right)_{(n, \gamma)}} = \frac{\lambda \cdot N}{\sigma \cdot \Phi \cdot N} = \frac{\lambda}{\sigma \cdot \Phi} \quad (14.4.1)$$

unde: λ = constanta de dezintegrare;
 σ = secțiunea de captură microscopică;
 N = numărul de nuclee radioactive ale unui izobar dat.

Cu cât fluxul este mai mare, cu atât otrăvirea reactorului este mai puternică.

Una dintre măsurile de prevenire a otrăvirii reactorului constă în înlocuirea periodică (cam la un an) a unei părți din elementele combustibile epuizate, în care izotopul fisionabil „a ars” în proporție de 20 ÷ 80 %. Compoziția combustibilului nuclear „ars” prin iradierea cu neutroni în reactor diferă mult de compoziția celui proaspăt, neiradiat, după cum se vede în tabelul 14.2.

Tabelul 14.2: Compoziția combustibililor „proaspăt” și „ars” de la un reactor de tip PWR (ref.[26])

Izotopul	Material combustibil nuclear (%)	
	„proaspăt”	„ars”
${}^{235}\text{U}$	3,3	0,81
${}^{236}\text{U}$	0	0,41
${}^{238}\text{U}$	96,7	94,53
${}^{239}\text{Pu}$	0	0,02
${}^{240}\text{Pu}$	0	0,53
${}^{241}\text{Pu}$	0	0,21
${}^{242}\text{Pu}$	0	0,11
${}^{243}\text{Pu}$	0	0,04
Produse de fisie și alte actinide (Am, Np, Cm)	0	3,34
Total	100	100

Avem: Np - 500 g /tona de U; Am - 151 g /tona de U; Pu - 9080 g /tona de U; Cu - 42,9 g /tona de U.

Astfel, din uraniul inițial în bară rămâne numai 96 %, restul transformându-se în produse de fisiune (3 %) și în elemente transuraniene (1 %) prin captură (n , γ).

14.5. DEPOZITAREA TEMPORARĂ ȘI REPROCESAREA ELEMENTELOR COMBUSTIBILE „ARSE”

Elementele combustibile epuizate au un nivel foarte ridicat de radioactivitate și de aceea, după scoaterea din reactor, sunt depozitate într-un bazin adânc (de minimum 3 m) cu apă, în apropierea reactorului, pentru 5 ÷ 12 luni, pentru a se dezactiva parțial („răcire”).

În timpul depozitării temporare, radionuclizii de viață scurtă se dezintegrează integral. Activitatea totală a unui element combustibil epuizat, se reduce la circa 3 % din valoarea inițială. În această fază, elementele combustibile pot fi transportate și supuse etapei următoare din ciclul combustibilului nuclear - reprocesarea.

Pentru perioada depozitării temporare în bazinele cu apă se iau o serie de precauții pentru preîntâmpinarea evenimentelor care pot conduce la contaminarea radioactivă puternică a mediului:

a) Circularea continuă a apei din bazin (pentru a se răci) și filtrarea (reținerea impurităților) la intrarea și ieșirea din bazin. Radiațiile intense emise de fragmentele de fisiune încălzesc apa care, prin circularea continuă, poate fi răcită.

b) Depozitarea elementelor combustibile se face astfel încât să se evite realizarea condiției de criticitate pentru combustibilul nuclear încă nefisionat. Această măsură se aplică în toate etapele ciclului combustibilului nuclear (CCN): prepararea uraniului de puritate nucleară, prepararea elementelor de ardere, până la reprocesarea și tratarea deșeurilor radioactive.

c) Clădirea în care se află bazinul de depozitare trebuie să îndeplinească normele de securitate privind protecția contra radiațiilor, rezistența la cutremure, explozii, bombardamente, inundații, incendii, etc.

În tabelul 14.3 sunt date produse de fisiune ce se găsesc în barele combustibile nucleare epuizate („arse”) după un timp de răcire de 12 luni. Izotopii cu numărul de masă A subliniat sunt radioactivi.

Datorită capacității tehnice existente în momentul de față, doar o mică fracție din combustibilul ars în CNE de pe glob este reprocesat.

Prin reprocesarea elementelor combustibile arse se urmărește separarea și recuperarea acelor elemente radioactive care prezintă interes pentru aplicațiile practice, de restul materialelor care vor forma deșeurile radioactive.

Materialul combustibil UO_2 și PuO_2 din interiorul tecilor este dizolvat în acid azotic și separat de tecile (zircaloy, oțel, etc.) care rămân nedizolvate.

În soluția acidă s-au format azotați de uranil și de plutoniu, precum și azotați ai produselor de fisiune.

Tabelul 14.3: Produse de fisiune (cu izotopi radioactivi subliniați) existente în barele combustibile „arse” după un timp de răcire de 12 luni(ref.[26])

Radionuclid	Număr de masă	Concentrația în	
		g/t uraniu	%
Kripton (Kr)	83, 84, 85, 86	350,5	1,10
Rubidiu (Rb)	85, <u>87</u> , 83	315,2	0,99
Strontiu (Sr)	<u>88</u> , <u>90</u>	836,0	2,64
Ytriu (Y)	88, 89	440,0	1,39
Zirconi (Zr)	90,91,92, <u>93</u> ,94, <u>95</u> ,96	3398,6	10,723
Molibden (Mo)	93, 95,96,97,98,100	3148,5	9,93
Tehnetiu (Tc)	<u>95</u> , <u>97</u> , 98, 99	770	2,43
Ruteniu (Ru)	100,101,102,103,104, <u>106</u>	1967,3	6,20
Paladiu (Pd)	<u>103</u> ,104,105,106, <u>107</u> ,108,110	1083,2	3,42
Telur (Te)	<u>125</u> ,126,130	500,7	1,58
Iod (I)	127,129	239,8	0,76
Xenon (Xe)	<u>127</u> , 128,130,131,132,134,136	4899,8	15,45
Cesiu (Cs)	133, <u>134</u> , <u>135</u> , <u>137</u>	2465,0	7,78
Bariu (Ba)	<u>133</u> , 134,136,137,138	1278,0	4,03
Lantan (La)	<u>137</u> , <u>138</u> , 139	1160,0	3,66
Ceriu (Ce)	<u>139</u> ,140, <u>141</u> , 142,144	2393,0	7,55
Neodim (Nd)	142,143,144,145,148,150	3137,2	9,90
Samariu (Sm)	<u>145</u> , <u>147</u> , 148, 149, 150, <u>151</u> , 152, 153, 154	749,1	2,38
Alte produse de	fisiune radioactive*	1967,1	4,63
	Total	31700	100

*) În această rubrică intră IR ai elementelor Niobiu (Nb), Argint (Ag), Cadmiu (Cd), Indiu (In), Staniu (Sn), Stibiu (Sb), Prometeu (Pm), Europiu (Eu) și altele, de asemenea produse ale fisiunii.

În procesul de dizolvare se degajă produse de fisiune gazoase (Kr, Xe) și produse de fisiune volatile (Br, I), alături de alte gaze neradioactive. Aceste gaze și reziduurile solide sunt tratate ca deșeuri radioactive.

Reprocesarea propriu-zisă se aplică soluției care conține materialul combustibil și are ca scop separarea uraniului, a plutoniului și a produselor de fisiune, folosindu-se o serie de procedee chimice, cum ar fi: precipitarea cu diferiți reactivi, extracția cu solvenți organici sau prin schimb ionic (vezi fig. 14.1), etc. Procedeele chimice de purificare a uraniului și plutoniului se repetă până se obține un grad înalt de puritate a lor. Tehnologiile sunt variate și foarte complexe. Uraniul și plutoniul recuperate sunt refolosite la prepararea combustibililor nucleari.

14.6. DEȘEURILE RADIOACTIVE. TRATARE ȘI DEPOZITARE

Deșeurile radioactive se împart în două categorii: brute și finite.

Deșeurile brute provin, în marca lor majoritate, de la instalațiile corespunzătoare diferitelor etape tehnologice ale ciclului combustibilului nuclear, de la obținerea uraniului, plutoniului, thoriului, în stare nucleară pură până la prepararea elementelor de ardere și apoi reprocessarea lor după ce au „ars” în reactor.

Reziduurile rămase după tratarea deșeurilor brute și care urmează a fi depozitate definitiv, astfel încât să nu constituie un risc pentru biosferă, formează deșeurile finite.

Deșeurile brute pot fi clasificate după starea fizică în: deșeuri gazoase, deșeuri lichide și deșeuri solide. Un alt criteriu de clasificare îl constituie activitatea specifică, după care pot fi grupate în trei categorii: deșeuri de activitate mică (sub $0,1 \text{ Ci / m}^3$), deșeuri de activitate medie (între $0,1$ și 10^4 Ci / m^3) și deșeuri de activitate mare (peste 10^4 Ci / m^3).

În normele republicane de radioprotecție (1976) sunt stabilite concentrațiile maxime admise în aer și apă (tabelul 14.4) pentru radionuclizi proveniți de la centralele nucleare electrice cu cea mai probabilă răspândire în mediu.

Tratarea și depozitarea deșeurilor radioactive au ca scop evitarea accesului radioizotopilor în mediu în concentrații periculoase. Există trei căi de realizare a acestei condiții:

- Diluarea gazelor radioactive și a apelor reziduale până la concentrații mai mici decât normele de radioprotecție corespunzătoare fiecărui izotop radioactiv conținut.
- Depozitarea temporară, controlată a deșeurilor până când izotopii radioactivi de viață scurtă s-au dezintegrat integral.
- Depozitarea finală a deșeurilor care conțin izotopi radioactivi de viață lungă (ani, zeci și sute de ani) în formă concentrată la volume cât mai mici și în condiții de deplină siguranță pentru biosferă..

Tabelul 14.4: Concentrațiile maxime admise în aer și apă pentru radionuclizii proveniți de la centralele nucleare electrice

Radionuclid	Concentrația (Ci / m ³)	
	în aer	în apă
³ H	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-3}$
¹⁴ C	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$
⁶⁰ Co	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-5}$
⁸⁵ Kr	$3 \cdot 10^{-7}$	—
⁹⁰ Sr	$3 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-7}$
⁹⁹ Tc	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁶ Ru	$2 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-5}$
¹³⁷ Cs	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-5}$
¹²⁹ I	$2 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-8}$
¹⁴⁷ Sm	$2 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-5}$
²²⁶ Ra	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-5}$
²³² Th	$1 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-5}$
²³⁵ U	$4 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-5}$
²³⁸ U	$5 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-5}$
²³⁹ Pu	$1 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Deșeurile radioactive rezultate din instalațiile de reprocesare a combustibilului nuclear sunt formate din deșeuri gazoase cu activitate mică și medie, deșeuri lichide cu activitate mică, medie și mare, deșeuri de solvenți organici contaminați cu produse de fisiune și deșeuri solide de activitate medie și mare.

14.6.1. DEȘEURI RADIOACTIVE GAZOASE

În timpul reacției de fisiune în lanț, în reactorul nuclear se produc circa 64 de izotopi radioactivi care în condiții de presiune și temperatură normale sunt în stare gazoasă sau care trec în stare gazoasă prin sublimare. Cei care se produc cu randament mai mare sunt izotopii kriptonului și xenonului, tritiul și carbonul-14.

majoritatea acestor izotopi radioactivi de tip gaz au timp de viață foarte scurt și după o „răcire” de câteva luni a combustibilului „ars” în curentul de gaze de la stația de reprocesare se mai întâlnesc nuclizii: ^{85}Kr , ^3H , ^{129}I , ^{131}I , ^{14}C , precum și aerosoli radioactivi (particule solide sau lichide care conțin alți izotopi radioactivi), alături de o mare cantitate de oxizi de azot.

Curentul gazos este supus unei serii de operații cum ar fi:

- separarea oxizilor de azot (prin condensare se reface și se reutilizează acidul azotic la reprocesare);

- separarea iodului (spălare cu apă și reținere într-un solvent organic);

- separarea particulelor de praf și a aerosolilor (prin filtrare);

- separarea tritiului și a gazelor rare.

Izotopii radioactivi ai iodului sunt produse de fisiune și au perioadele de înjumătățire $T_{1/2} (^{129}\text{I}) = 1,7 \cdot 10^7$ ani și $T_{1/2} (^{131}\text{I}) = 8,05$ zile.

După „răcirea” materialului combustibil (circa 6 luni) rămâne numai izotopul ^{129}I . Din reprocesarea a 1500 tone de UO_2 „ars” într-un reactor cu puterea instalată de 1.000 MWe și cu un grad mediu de ardere de 45.000 MWzi /t rezultă circa 540 kg de iod, corespunzând unei activități $A (^{129}\text{I}) = 75$ Ci.

Tritiul se formează în toate tipurile de reactoare nucleare, ca produs al fisiunii ternare. La reactoarele care au ca moderator apa grea, tritiul se formează și prin reacția neutronilor cu nucleele de deuteriu din moderator:



Tritiul gazos se separă din materialul combustibil prin convertirea lui în apă tritiată HTO (apă supergrea). Această conversie chimică se produce prin tratarea cu oxigen în exces la $450^\circ \div 700^\circ\text{C}$ a combustibilului „ars” înainte ca acesta să fie dizolvat în acid azotic.

Dacă în rețeaua de canalizare se deversează apă tritiată, aceasta poate să se evapore și să contamineze cu tritiu mediul ambiant și în primul rând atmosfera.

Kriptonul (^{85}Kr) cu perioada de înjumătățire $T_{1/2} = 10,7$ ani se poate reține din deșeurile gazos prin diferite tehnici, ca de exemplu: metoda criogenică (condensarea cu azot lichid), adsorbția pe cărbune, extracție prin dizolvare în tetrafluorura de carbon, etc., după care se stochează în recipiente metalice rezistente la presiuni mari. Din 1.500 tone combustibil (UO_2) rezultă o activitate $A (^{85}\text{Kr}) = 10^6$ Ci.

14.6.2. DEȘEURI RADIOACTIVE LICHIDE

Deșeurile radioactive lichide (DRL) de activitate mare provin din reprocesarea materialului combustibil epuizat, după prima treaptă de extracție. În soluția apoasă de acid azotic se regăsește aproape toată cantitatea de produse de fisiune, de elemente transuraniene și

urme de plutoniu și de uraniu. La o tonă de combustibil UO_2 ars rezultă circa $6,5 \text{ m}^3$ soluție radioactivă, căreia i se micșorează apoi volumul prin diferite procedee: evaporare, calcinare, vitrifiere.

Deșeurile radioactive lichide de activitate mare se solidifică pentru a micșora mobilitatea izotopilor radioactivi. Ideal, produsul final trebuie să satisfacă o serie de cerințe: insolubilitate în apă sau alți solvenți, rezistență la solicitări mecanice, termice și la acțiunea radiațiilor nucleare, rezistență la coroziunea chimică, conductibilitate termică ridicată, să fie neincinerabil.

Deșeurile radioactive lichide de activitate medie sunt formate din apele reziduale rezultate în diferitele etape ale reprocesării combustibilului nuclear, distilatul obținut în faza de evaporare a deșeurilor radioactive lichide de activitate mare și o serie de alte soluții acide sau bazice provenite din diverse activități și etape de lucru cu izotopi radioactivi: decontaminarea camerelor, a ustensilelor și aparatelor, deșeuri lichide realizate în mod curent în unitățile nucleare care lucrează cu surse deschise de activitate medie, etc.

Cei mai importanți izotopi radioactivi conținuți în deșeurile radioactive lichide de activitate medie, proveniți de la stația de reprocesare sunt: $^{95}_{40}\text{Zr}$, $^{95}_{41}\text{Nb}$, $^{106}_{44}\text{Ru}$, $^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{137}_{55}\text{Cs}$ și urme de ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , etc.

În cazul deșeurilor radioactive lichide de activitate medie se procedează mai întâi la extragerea unei fracții cât mai mari din izotopii radioactivi conținuți, iar lichidul rezidual trebuie să aibă o activitate cât mai redusă care să permită deversarea lui în sistemul de canalizare fără riscul de poluare radioactivă a mediului.

Deșeurile radioactive lichide de activitate mică sunt formate din apele reziduale finale de la instalațiile de reprocesare și din efluenții radioactivi din laboratoarele unde se lucrează cu surse radioactive deschise.

În apele reziduale de la instalațiile de reprocesare sunt conținuți în cantități mici izotopii radioactivi: ^3_1H , $^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{106}_{44}\text{Ru}$ și $^{137}_{55}\text{Cs}$. Dacă acești izotopi radioactivi au concentrații mai mari decât normele admise, apele respective sunt mai întâi purificate prin diverse procedee ca: distilarea, utilizarea de colectori microbiologici, precipitarea, schimbul ionic, diluția cu o mare cantitate de apă naturală. Când concentrațiile izotopilor radioactivi ajung sub limita maximă admisă, apele reziduale pot fi evacuate în sistemul de canalizare.

14.6.3. DEȘEURI RADIOACTIVE SOLIDE

În categoria deșeurilor radioactive solide (DRS) se consideră tecile de la barele combustibile, ustensilele de lucru, aparatele, materialele de construcții, masele plastice, metalele, hârtia, filtrele, rășinile schimbătoare de ioni, etc., care sunt contaminate cu izotopi radioactivi.

Unele dintre aceste deșeuri sunt incinerate pentru a li se reduce volumul (cenușă) în condiții speciale: combustie completă, decontaminarea gazelor de ardere, evitarea pierderii de cenușă radioactivă.

Deșeurile care nu pot fi incinerate sunt supuse comprimării cu prese hidraulice și sunt introduse în butoaie. În aceste butoaie cu materiale radioactive se toarnă ciment până ce se formează o manta care îmbracă din interior și din exterior izotopii radioactivi, asigurând rezistența la agenții corozivi a acestor deșeuri - monolit care se poate depozita în final.

Pentru depozitarea finală sunt luate în considerare diverse variante:

- *depozitarea în pământ, în special în mine de sare gemă* (~ 500 m adâncime, sarea gemă având rezistență mecanică bună, ca și a cimentului, conductibilitate termică bună, de 2 ÷ 3 ori mai mare ca a altor roci, are o bună plasticitate care asigură etanșeizarea de la sine a fisurilor și crăpăturilor ce pot să apară în urma cutremurelor),
- *depozitarea în spațiul extraterestru.*

Depozitarea pe tUNDUL Oceanului Planetar este interzisă.

În prezent, problemele legate de tratarea, stocarea și depozitarea deșeurilor radioactive sunt departe de a fi soluționate astfel încât să se asigure eliminarea oricărui risc de contaminare a mediului ambiant, deci și pentru viața pe planeta noastră, dar căutările în această direcție continuă.

14.7. SECURITATE ȘI RISC ÎN ENERGETICA NUCLEARĂ

În cazul unui reactor nuclear, riscul nu este de tip „explozie nucleară”, ci de tip „contaminare radioactivă a mediului înconjurător”.

Într-adevăr, un reactor nuclear de 1.000 MWe putere instalată conține, după o perioadă de funcționare de un an, o cantitate de izotopi radioactivi - produse de fisiune de viață lungă, comparabilă cu cea produsă de 1.000 de bombe de tip Hiroshima. Totuși, o explozie nucleară nu este posibilă din punct de vedere fizic.

Dacă în mod accidental (necontrolat) reactorul trece în regim supracritic, temperatura foarte înaltă care se creează provoacă topirea barelor combustibile, neutronii părăsesc zona activă, iar reacția în lanț divergentă este oprită.

În schimb, contaminarea radioactivă a mediului este un risc mult mai probabil și el este corelat cu diferitele tipuri de avarii sau accidente ce se pot produce la un reactor nuclear. De aceea, la proiectarea și construcția unui reactor se are în vedere un astfel de risc și sunt prevăzute o serie de bariere contra produselor de fisiune:

☐ Tecile de zircaloy (sau alte materiale) în care se introduce materialul fisionabil (U, Pu);

☐ Vasul de presiune al reactorului realizat din oțel inoxidabil înalt aliat (grosime pereți circa 15 cm) și care se zidește în beton (grosime 0,5 ÷ 3 m) care asigură și o primă protecție contra radiațiilor (primul scut de protecție biologică);

☐ Vasul de siguranță de formă sferică, făcut din oțel inoxidabil (grosimea peretelui circa 30 cm) care înconjoară vasul de presiune;

☐ Mantaua sferică din oțel (grosime circa 5 mm) care înconjoară vasul de siguranță la aproximativ 7 cm distanță de suprafața acestuia și blochează scăparea de gaze radioactive prin acesta. În spațiul dintre vasul de siguranță și mantaua din oțel se menține o stare de subpresiune care împiedică produsele gazoase radioactive acumulate aici să părăsască acest spațiu în exteriorul mantalei;

☐ Zidul exterior din beton sau cupola (al doilea scut de protecție biologică).

Vasul de siguranță și cupola de beton sunt astfel proiectate încât să reziste la cutremure, bombardamente clasice, prăbușirea unui avion cu reacție, etc.

Tot din proiectare sunt luate în considerare diversele tipuri de avarii posibile la un reactor nuclear și sunt prevăzute multiple sisteme de siguranță pentru diminuarea sau chiar anularea totală a efectelor dăunătoare cauzate de acestea.

Printre avariile cele mai grave se consideră:

- fisura (mare, medie sau mică) în conducta principală a agentului primar de răcire;
- întreruperea curentului electric care alimentează sistemul de intervenție în caz de avarie;
- defecțiuni la alimentarea principală cu apă de răcire, etc.

Printre avariile care sunt însoțite de eliberarea produselor de fisiune în mediu sunt următoarele:

- topirea miezului reactorului cu explozie de abur și gaze;
- topirea miezului reactorului cu fisură mare, medie sau mică a vasului de siguranță;
- pierderea controlului la agentul primar de răcire; etc.

Un accident nuclear în care este fisurat sau distrus vasul de siguranță și cupola (anvelopa) din beton este urmat de eliberarea în spațiul atmosferic a materialului radioactiv din „inventarul” reactorului: produși de fisiune și de activare, uraniu neurs și plutoniu format prin activare în paralel cu fisiunea uraniului.

Din cauza căldurii care se degajă din miezul reactorului, izotopii radioactivi sunt antrenati în afară, formând în atmosferă un „nor radioactiv”.

Vântul preia norul, îl extinde și îl poartă în diferite direcții. Prin depunere gravitațională și prin precipitații care „spală” norul de izotopi radioactivi, aceștia ajung la sol și pătrund în interiorul acestuia la diferite adâncimi.

În acest fel are loc contaminarea totală a biosferei, organismele vii sunt supuse acțiunii radiațiilor emise de izotopii radioactivi aflați în aer, apă, sol și subsol.

Studii comparative de risc efectuate în țări cu o rețea mare de centrale nucleare electrice (SUA, Franța, etc.) arată că riscurile datorate funcționării concomitente a 100 asemenea centrale sunt cu ordine de mărime mai mici (10^{-3} ÷ 10^{-4}) față de riscurile rezultate din accidente din alte tipuri de instalații tehnologice decât cele nucleare sau generate de factori naturali.

Dar, accidentele nucleare care au avut loc în 1979 la Three Miles Island (SUA) și în 1986 la Cernobîl (Ucraina) - în ambele cazuri a avut loc topirea miezului reactorului - au determinat reevaluarea frecvenței de producere a unor avarii grave la cei 100 de reactori și au condus la valori crescute cu circa două ordine de mărime a acestor frecvențe.

În ref. [26] se arată în detaliu ce s-a întâmplat în accidentul de la Cernobîl. Datorită unor abateri grave de la normele de securitate în funcționarea reactorului pe care echipa de exploatare - cercetare le-a comis (decuplarea tuturor sistemelor de siguranță în caz de avarie), a avut loc o creștere necontrolată a reactivității reactorului, o scădere drastică a debitului apei de răcire circulată prin reactor, creșterea temperaturii în reactor și declanșarea unei generări intense de vapori, deficit în preluarea de căldură, distrugerea elementelor de combustibil nuclear, fierberea agentului termic care conținea acum și particule de combustibil distrus, creșterea presiunii din reactor și blocarea circulației apei în zona activă. Crește extrem de rapid presiunea de vapori, între abur și zirconiu se produce o reacție chimică violentă, ca și alte reacții chimice exoterme în care se generează hidrogen și oxigen, adică un amestec

exploziv. Amestecul exploziv din diferite încăperi a atins nivelul de explozie, iar reactorul și clădirea grupului energetic au fost distruse de o serie de explozii puternice ale amestecului exploziv. Au fost aruncate în atmosferă 50 tone de combustibil nuclear în stare de vapori, creându-se un imens rezervor de izotopi radioactivi cu viață lungă (cât zece bombe de tip Hiroshima, fără factorii primari de distrugere specifici exploziei nucleare). De asemenea, 70 tone de combustibil nuclear și circa 700 tone de grafit radioactiv din reactor au fost depuse în zona grupului energetic avariat. Activitatea în zona grupului energetic (doza debit) a fost de $1.000 \div 15.000$ roentgeni pe oră. Miezul reactorului conținea un inventar radioactiv de circa $4 \cdot 10^{19}$ Bq înainte de accidentul din 25 aprilie 1986, din care s-a eliberat în atmosferă $1 \div 2 \cdot 10^{18}$ Bq (fără a fi considerate și gazele nobile). În tabelul 14.5 este dată compoziția izotopică a acestui inventar și procente din acest inventar eliberate în atmosferă, după datele experților sovietici.

Din tabel se observă că radionuclizii mai volatili (I, Cs, Te) au fost eliberați din combustibil în proporție de $10 \div 20$ %, în timp ce radionuclizii mai puțin volatili (Ba, Sr, Pu, Ce, etc.) s-au eliberat în proporție de numai $3 \div 6$ %. Materialul radioactiv s-a dispersat în aer prin difuzie, dar mai ales prin transport aerian pe distanțe foarte mari, contaminând o mare parte din Europa (nordul, centrul, estul și sud-estul continentului), printre care și țara noastră. Pentru zona București - Măgurele s-a raportat o depunere radioactivă foarte crescută, de circa $130 \text{ kBq/m}^2/\text{zi}$ la data de 2 mai 1986, datorită trecerii norului radioactiv și ploii care a coincis cu această trecere.

Accidente nucleare la centralele nucleare electrice sau la fabricile de combustibil nuclear au fost destul de multe pe glob și variate din punct de vedere al naturii accidentului și al urmărilor lui.

Ca urmare a diferitelor accidente s-au produs:

- explozii chimice și incendii;
- contaminarea apei potabile și a apei de râu cu substanțe radioactive din depozitul de deșeuri sau din filtrele de apă;
- evacuare de gaze radioactive și lichide radioactive în mediu;
- emisie de vapori radioactivi în atmosferă;
- scurgere de apă radioactivă în afara CNE;
- supraradierea personalului de exploatare ;
- decesul unor persoane de la exploatarea CNE;
- supraradierea populației civile din zonă;
- contaminarea generalizată a mediului și evacuarea populației din zonă;
- formarea de nori radioactivi care au condus la căderi radioactive umede și uscate pe zone foarte extinse.

Efectele supraradiierilor au variat în funcție de dozele încasate: de la decese într-un timp mai scurt (de ordinul orelor) sau mai lung (zile, luni), ulceratii, bronzare, boala de radiații, căderea părului, etc., până la leucemii și cancere. Efectele sunt asemănătoare cu cele din cazul exploziilor nucleare de la Hiroshima și Nagasaki, dar numărul de persoane afectate de supraradiere datorită accidentelor nucleare este practic infim față de populațiile celor două orașe - practic integral afectate de exploziile nucleare. Dar, la nivel de individ, situația este la fel de dramatică în ambele cazuri. De aceea, în cazul centralei nucleare electrice se fac eforturi deosebite pentru prevenirea chiar și a avariilor minore.

Tabelul 14.5: Inventarul izotopilor radioactivi, activitatea și procente eliberate în atmosferă la Cernobâl

Izotop radioactiv	$T_{1/2}$ (zile)	Λ (Bq)	Procente de eliberare (%)
^{85}Kr	3930	$3,3 \cdot 10^{16}$	100
^{133}Xe	5,27	$1,7 \cdot 10^{18}$	100
^{131}I	8,05	$1,3 \cdot 10^{18}$	20
^{132}Te	3,25	$3,2 \cdot 10^{17}$	15
^{134}Cs	750	$1,9 \cdot 10^{17}$	10
^{137}Cs	$1,1 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^{17}$	13
^{99}Mo	2,8	$4,8 \cdot 10^{18}$	2,3
^{95}Zr	65,5	$4,4 \cdot 10^{18}$	3,2
^{103}Ru	39,5	$4,8 \cdot 10^{18}$	2,9
^{106}Ru	368	$2,0 \cdot 10^{18}$	2,9
^{140}Ba	12,8	$2,9 \cdot 10^{18}$	5,6
^{141}Ce	32,5	$4,4 \cdot 10^{18}$	2,3
^{144}Ce	284	$3,2 \cdot 10^{18}$	2,8
^{89}Sr	53	$2,0 \cdot 10^{18}$	4,0
^{90}Sr	$1,02 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^{17}$	4,0
^{239}Np	2,35	$1,4 \cdot 10^{17}$	3,0
^{238}Pu	$3,15 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^{15}$	3,0
^{239}Pu	$8,9 \cdot 10^6$	$8,5 \cdot 10^{14}$	3,0
^{240}Pu	$2,4 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^{15}$	3,0
^{241}Pu	4800	$1,7 \cdot 10^{17}$	3,0
^{242}Cm	164	$2,6 \cdot 10^{16}$	3,0

Securitatea nucleară a planetei impune luarea unor măsuri tehnico-științifice foarte riguroase și de înaltă exigență, de la proiectarea și până la exploatarea reactoarelor nucleare energetice, pentru reducerea drastică a accidentelor nucleare, pentru că nevoia de energie a planetei nu poate fi satisfăcută, fără utilizarea energiei nucleare, o bună perioadă de timp în viitor.

CAPITOLUL 15

EXPLOZII NUCLEARE. ARME NUCLEARE

15.1. INTRODUCERE

Explozia primei bombe atomice experimentale a avut loc la 16 iulie 1945 în deșertul Alamogordo, în Statul New Mexico, SUA. Explozia s-a produs în atmosferă, bomba fiind instalată pe un turn de mică înălțime.

Efectele acestui experiment „reușit” au fost formarea unui crater adânc de 30 m și diametrul de 250 m pe locul exploziei și contaminarea radioactivă a întregului teritoriu din jur pe o rază de circa un km, contaminare persistentă timp de mai mulți ani.

La 6 și 9 august 1945 au fost lansate primele bombe atomice: o bombă cu uraniu asupra orașului Hiroshima și o bombă cu plutoniu asupra orașului Nagasaki, bombe care au distrus complet aceste două orașe. În aceste bombe atomice s-a folosit energia eliberată prin fisiunea în lanț a nucleelor de uraniu și de plutoniu sub acțiunea neutronilor. Au urmat apoi serii întregi de experimentări ale exploziilor nucleare în SUA și URSS.

La 22 ianuarie 1954 a avut loc prima explozie experimentală a unei bombe termonucleare, bombă cu hidrogen, efectuată de americani pe atolul Bikini. De atunci, s-au experimentat numeroase explozii nucleare (explozii în atmosferă, la mică și mare înălțime, explozii subterane și explozii subacvatice) efectuate de diverse țări: SUA, URSS, China, Franța, ultimele fiind efectuate în 1995 de către Franța și în 1998 de India și Pakistan.

15.2. BOMBE ATOMICE (HIROSHIMA)

În figura 15.1 este reprezentată schema de principiu a unei bombe atomice care folosește drept sursă de energie fisiunea ^{235}U sau a ^{239}Pu sub acțiunea neutronilor.

La baza principiului de funcționare a unei astfel de bombe se află posibilitatea deslășurării reacției de fisiune în lanț în regim divergent până la declanșarea exploziei nucleare, dacă materialul fisionabil este o bucată de material fisil cât mai pur (^{235}U sau ^{239}Pu) a cărui masă este egală sau mai mare decât masa critică corespunzătoare izotopului respectiv. Puterea exploziei nucleare este cu atât mai mare cu cât cantitatea de material fisil este mai mare. Acest material este porționat în mai multe bucăți, fiecare având masa mai mică decât masa critică, așezate la distanță una de cealaltă, ca în fig. 15.1, într-o geometrie dată.

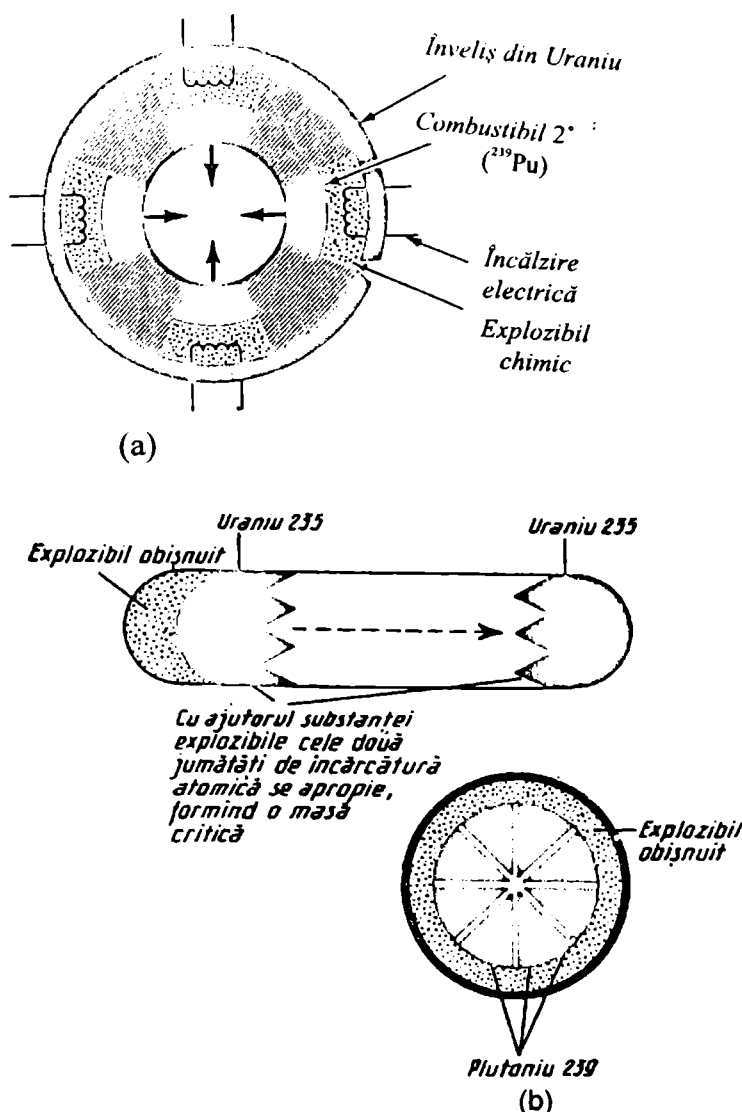


Figura 15.1: Schema unei bombe atomice (a) și formarea masei critice a substanței fisionabile din bomba atomică (b)

La periferia combustibilului nuclear se plasează un material explozibil obișnuit, care poate fi încălzit cu niște rezistențe electrice.

La detonarea bombei, rezistențele încălzesc substanța chimică care explodează, împingând bucățile de ^{235}U (sau ^{239}Pu) una spre alta, le unesc, se depășește masa critică și apare reacția în lanț care duce la o creștere exponențială a numărului de neutroni:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{\alpha t} = N_0 \cdot e^{\frac{t}{\tau_k}} \quad (15.2.1)$$

unde τ_k este timpul mediu de generare a unei generații de neutroni și are o valoare tipică $\sim 10^{-8}$ s.

După aproximativ $0,5 \mu\text{s}$ (echivalent cu 50 de generații), numărul de neutroni produși într-o generație, adică într-un timp $t \sim 10^{-8}$ s, este foarte mare: $N \sim 10^{24}$ neutroni / 10^{-8} s, și se eliberează o cantitate imensă de energie într-un interval de timp extrem de scurt

(10^8 s) astfel încât totul explodează. Tipic, această energie eliberată este $E_{\text{elib}} \sim 1 \div 100$ ktone de trinitrotoluen (1 ktonă = 10^{12} cal = $2,61 \cdot 10^{11}$ eV = $2,61 \cdot 10^{25}$ MeV), dar s-a ajuns la sute și chiar mii de ktone (Mtone).

15.3. TRĂSĂTURI CARACTERISTICE ALE EXPLOZIEI BOMBELOR ATOMICE

Trăsăturile caracteristice ale unor astfel de explozii sunt:

- ☐ formarea unei bile de foc (cu temperaturi ce ating în interior zeci de milioane de K);
- ☐ radiații nucleare (prompte);
- ☐ radiație termică;
- ☐ formarea de cratere;
- ☐ seism nuclear (cutremur);
- ☐ undă de șoc în atmosferă (suflul exploziei);
- ☐ aruncare de schije;
- ☐ căderi radioactive.

Toți acești factori sunt interdependenți. Succesiunea rapidă a evenimentelor într-o explozie nucleară începe cu reacțiile nucleare și cu radiațiile produse în incinta bombei, dar dozele de radiații provenite atât de la radiațiile prompte cât și de la căderile radioactive considerate la o anumită distanță de locul exploziei sunt puternic influențate de dinamica exploziei. Unda de șoc din aer și expansiunea violentă a bilei de foc determină natura radiației termice la început și mai târziu. În acțiunea de „craterizare” se transferă o mare parte din materialul de pe pământ în bila de foc primară, influențând astfel și radiația termică și căderile radioactive.

În figura 15.2 este prezentată evoluția în timp a exploziei nucleare și formarea norului în formă de ciupercă la Hiroshima, așa cum a fost descrisă pe baza observațiilor făcute la o stațiune meteorologică aflată la 3,6 km de Hiroshima, în zona munților Enami.

În figura 15.3 sunt figurate zonele în limitele cărora s-au făcut simțite efectele radiațiilor nucleare prompte, a radiațiilor luminoase și a undei de șoc provenite de la aceeași bombă de la Hiroshima.

Radiațiile nucleare prompte sunt formate din fluxuri imense de neutroni rezultați din fisiune, radiații β și γ emise de fragmentele de fisiune, radiații α și fragmente de fisiune. Radiațiile α , β și fragmentele de fisiune nu ajung la pământ, ele cedându-și energia aerului și vaporilor de apă din atmosferă care astfel se încălzește. La suprafața pământului ajung numai razele γ care în final sunt absorbite și neutronii care, după ce sunt încetiniți, produc activarea practic a tuturor materialelor cu care vin în contact (substanțe anorganice sau organice) prin captură radiativă (n, γ) și care devin astfel radioactive.

Atât obiectele cât și organismele vii (oameni, plante, animale) aflate în apropierea centrului exploziei de la Hiroshima au rămas cu o radioactivitate remanentă, apărută sub acțiunea neutronilor.

La vătămările produse omului de radiațiile luminoase (arsuri) și de unda de șoc (traumatisme) ale bombei nucleare, vătămări care se produc de altfel și la explozia unei

bombe obișnuite, dar respectând proporțiile, se adaugă și leziunile produse de radiațiile nucleare primare (γ și neutroni), a radioactivității induse și a radioactivității remanente care își au originea în norul radioactiv.

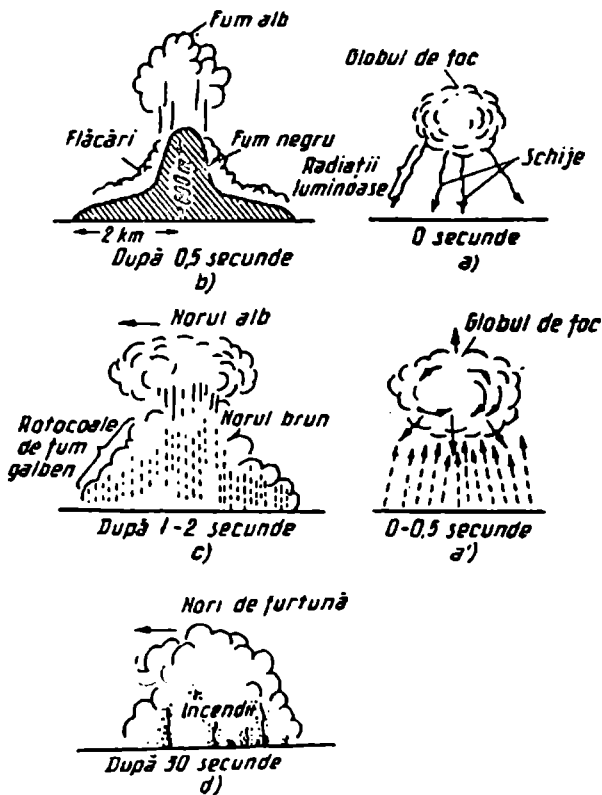


Figura 15.2: Evoluția în timp a exploziei nucleare și formarea norului-ciupercă la Hiroshima(ref.[34])

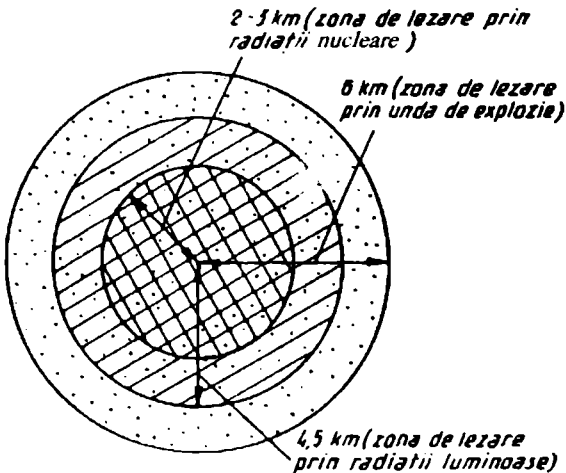
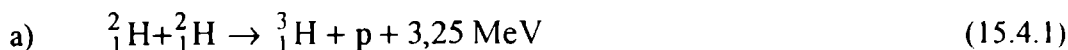


Figura 15.3: Schema aproximativă a acțiunii undei de șoc, a radiațiilor luminoase și a radiațiilor nucleare prompte (ref.[34])

15.4. BOMBE TERMONUCLEARE CU HIDROGEN ȘI LITIU (ATOLUL BIKINI)

În bombele termonucleare se utilizează energia eliberată în reacțiile de fuziune a elementelor ușoare cum sunt hidrogenul, deuteriul, tritiul, litiul, etc.

Fuziunea se produce la temperaturi extrem de înalte (de aceea se și numește reacție termonucleară), la care atomii sunt total ionizați, iar nucleele „goale” au viteze foarte mari, care le permit să escaladeze barierele coulombiene. Nucleele se apropie unele de altele până la distanțe foarte mici, la care intră în acțiune forțele nucleare atractive și se produce fuziunea lor, ca în exemplele următoare:



Pentru ca două nuclee de deuteriu să fuzioneze (cazurile a și b), este necesar să se mențină o temperatură de $4 \cdot 10^8 \text{ K}$, timp de câteva milionimi (10^{-6}) de secundă.

Dacă reacția de fuziune se realizează cu deuteriu și tritiu (cazul c) temperatura necesară este de 10^8 K .

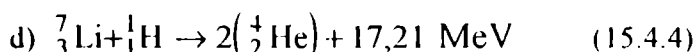
Prin fuziunea a doi atomi ușori se eliberează mai puțină energie decât prin fisiunea unui nucleu de uraniu. Dar, întrucât masa nucleului de hidrogen este mult mai mică decât a celui de uraniu, la mase egale de combustibil, reacția termonucleară cu hidrogen va elibera mai multă energie decât reacția de fisiune a uraniului.

Temperatura necesară se realizează prin explozia preliminară a unei bombe atomice cu uraniu sau cu plutoniu perfecționate, de randament foarte mare, care dezvoltă o temperatură absolut suficientă pentru producerea reacției termonucleare cu hidrogen.

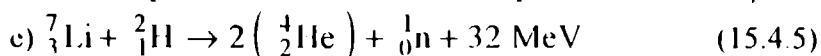
Pentru eficacitatea reacțiilor termonucleare, combustibilul format din gazele de deuteriu sau deuteriu + tritiu trebuie răcite la presiuni foarte mari și lichefiate.

Instalația frigorifică și aparatele necesare lichefierii și funcționării bombei au dimensiuni și greutatea foarte mari, ceea ce pentru o bombă este foarte incomod.

În replică s-a realizat bomba cu litiu, care folosește reacția de fuziune între ${}^7\text{Li}$ și hidrogenul obișnuit:



care are loc la temperatura $T = 5,1 \cdot 10^9 \text{ K}$, sau pe cea dintre litiu și deuteriu:



are loc la temperatura $T = 4,4 \cdot 10^9 \text{ K}$

Schema de principiu a acestei bombe este dată în figura 15.4 și este ceea ce, la ora actuală, se înțelege prin „bombă cu hidrogen”.

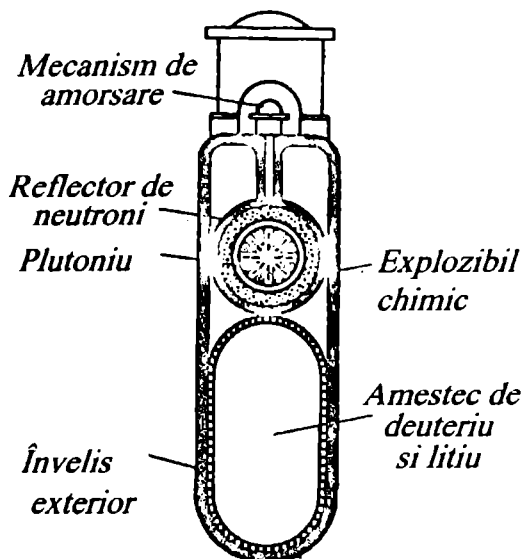


Figura 15.4: Schema de principiu a bombeii cu hidrogen

Temperatura inițială necesară fuziunii ${}^7\text{Li} + {}^2_1\text{H}$ sau ${}^7\text{Li} + {}^1_1\text{H}$ este generată de o mică „bombă cu hidrogen” cu combustibilul format din deuteriu + tritiu (${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$).

Combustibilul propriu-zis, format din (${}^1_1\text{H} + {}^7_3\text{Li}$) sau (${}^2_1\text{H} + {}^7_3\text{Li}$) se poate utiliza sub forma unei combinații solide numită „litiu - deuteriu”, fapt care face mult mai comodă utilizarea acestei bombe

În cursul exploziei unei încărcături de 200 kg litiu - deuteriu se eliberează de 600 de ori mai multă energie decât în cursul exploziei unei bombe de tip Hiroshima. O astfel de bombă se pare că a explodat la 1 martie 1954 în atolul Bikini, în care drept focos s-a folosit o bombă atomică cu plutoniu.

La bombele cu hidrogen se formează, în general, o cantitate mai mică de „cenură radioactivă” (norul radioactiv) decât în cazul bombeii atomice obisnuite. Totuși, la bomba explodată în atolul Bikini s-a format un nor radioactiv uriaș, care l-a depășit cu mult pe cel format la explozia bombeii de la Hiroshima.

În fig. 15.5 se prezintă comparativ razele de acțiune a bombeii atomice de la Hiroshima și a bombeii cu hidrogen lansată în atolul Bikini, în ipoteza că cele două bombe ar fi lansate la Tokio.

Explicația constă în faptul că la acest tip de bombă s-a adăugat o cantitate mare (câteva tone) de ${}^{238}\text{U}$ din care o bună parte fisionează sub acțiunea neutronilor rapizi rezultați din reacția de fuziune ${}^7\text{Li} + {}^2_1\text{H}$, fapt care duce la formarea imensului nor de cenură radioactivă în care se află produsele de fisiune ale ${}^{238}\text{U}$.

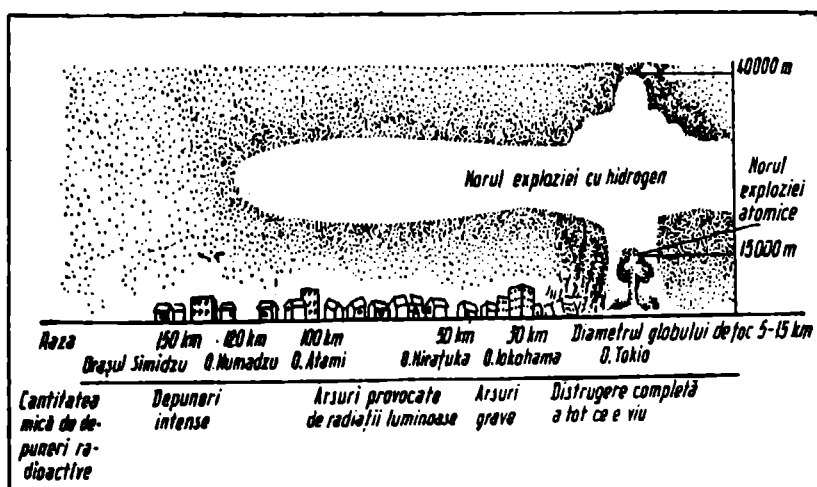


Figura 15.5: Razele de acțiune ale bombelor atomice de la Hiroshima și a bombelor cu hidrogen din atolul Bikini (ref. [34])

15.5. NORII RADIOACTIVI FORMAȚI PRIN EXPLOZIA BOMBELOR NUCLEARE

Substanțele radioactive din norul radioactiv format prin exploziile bombelor nucleare sunt:

- ☐ produși de fisiune ai uraniului și plutoniului cu neutroni rapizi;
- ☐ particule de uraniu și plutoniu nefisionat, nedeintegrat;
- ☐ vapori de metale sau de alte materiale care s-au activat sub acțiunea fluxului puternic de neutroni rezultați în timpul exploziei;
- ☐ praf care s-a activat în timpul exploziei.

Cea mai mare parte a imensei energii dezvoltate în bombele atomice se transformă în căldură, o parte fiind preluată de radiațiile γ emise și de neutroni, iar altă parte aflându-se sub formă de energie de excitare a fragmentelor de fisiune.

Inițial energia este consumată prin formarea globului de foc de la care se emite radiația termică și unda de șoc care provoacă distrugerii uriașe.

În cazul exploziei în atmosferă a unei bombe nucleare „standard” (fisiunea a 1 kg de ^{235}U , echivalentă cu $Q = 2 \cdot 10^{13}$ kcal sau cu energia rezultată la explozia a 20.000 tone de TNT), activitatea γ a produșilor de fisiune din nor este imensă și scade în timp după cum se vede în tabelul 15.1.

Tabelul 15.1:

Intervalul de timp după explozie	Λ_{γ} (Ci)
1 minut	$8,2 \cdot 10^{11}$
1 oră	$6,0 \cdot 10^9$
1 zi	$1,3 \cdot 10^8$
1 săptămână	$1,3 \cdot 10^7$
1 lună	$2,3 \cdot 10^6$

După explozia în atmosferă, particulele solide sunt formate din fragmente din corpul bombei și a instalațiilor ajutătoare care s-au evaporat în timpul exploziei și s-au condensat prin răcire. Numai cantități mici de sol sau de alte substanțe de la suprafața pământului sunt antrenate în norul radioactiv.

În exploziile „la sol”, din contactul globului de foc cu suprafața pământului se produce nu numai activarea unor mase imense de rocă, dar și includerea a zeci de tone de pământ în norul radioactiv datorită radiației termice foarte intense care pătrunde în sol.



Figura 15.6: *Norul tipic format la explozia în atmosferă a unei bombe atomice (experiment nuclear, Nevada, 22 aprilie 1952, după ref.[28])*

O altă consecință a contactului globului de foc cu solul este condensarea substanțelor radioactive evaporate pe particulele de sol. În consecință, particulele radioactive din nor au dimensiuni mai mari decât cele de la norul radioactiv de la explozia în atmosferă.

La exploziile subterane sau subacvatice (fig. 15.7), în atmosferă se ridică cantități mari de rocă sau apă, în mare parte radioactive. Dar, în acest caz, norul nu se ridică la înălțimi la fel de mari ca la exploziile la suprafață sau în atmosferă.

La o secundă după explozia în atmosferă sau la suprafața pământului, globul de foc atinge dimensiunea maximă și, după puțin timp, acest balon format din gaze supraîncălzite începe să se înalțe cu o viteză care după câteva secunde atinge ~ 100 m/s pe verticală.

Ascensiunea continuă până când gazele, datorită emisiei de radiație termică, a amestecului cu atmosfera și a expansiunii adiabatică, se răcesc până la temperatura aerului înconjurător.

În timpul ascensiunii, norul capătă forma de ciupercă.

Pe mișcarea de bază a norului se suprapun perturbații pe zone restrânse, datorate curenților turbulenți care produc difuzia norului pe orizontală și pe verticală.

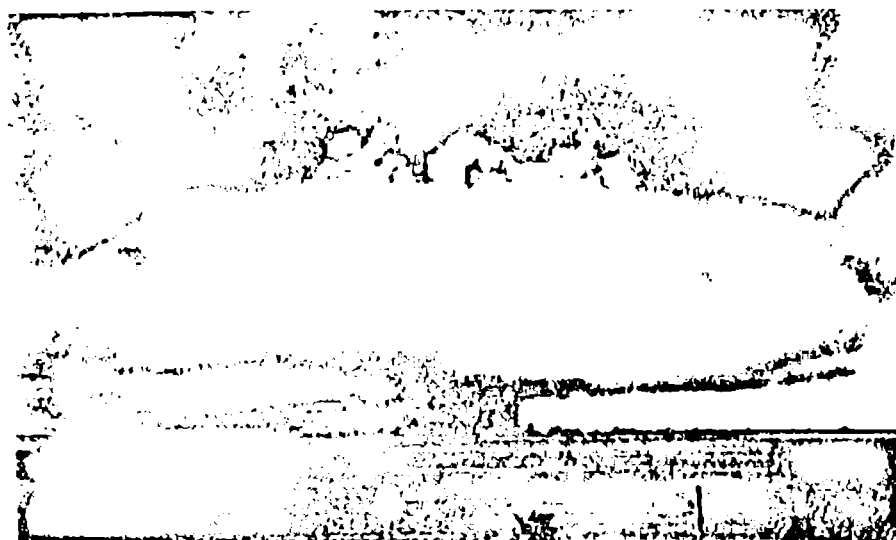


Figura 15.7: Norul de condensare format la o explozie nucleară subacvatică produsă în atolul Bikini, în 1946 (ref.[28])

Distribuția activității Λ la suprafața pământului în imediata vecinătate a locului exploziei depinde esențial de dimensiunile particulelor din care este format norul, deci și de altitudinea la care a avut loc explozia. La explozia în atmosferă, globul de foc nu atinge direct pământul, particulele radioactive au dimensiuni foarte mici (evaporarea materialului de pe bombă), deci și o viteză foarte mică de depunere. Astfel, în zona vecină exploziei nu au loc depuneri (căderi) importante de substanțe radioactive. Situația se schimbă dacă explozia are loc la altitudine mică: particulele radioactive au dimensiuni mari, viteză de cădere mare, locul din jur este contaminat de „căderi radioactive”.

Dacă în timpul exploziei se observă precipitații, atunci cea mai mare parte a produselor radioactive cade odată cu ele (ex. „ploi radioactive”).

Când norul radioactiv este transportat la distanță mare de locul exploziei, depunerea (căderea) gravitațională este mai puțin importantă, deoarece în nor au rămas numai particulele cele mai mici care pot fi privite ca suspensii coloidale pasive în atmosferă. În acest caz, efectul turbulențelor locale domină efectul gravitațional.

Deplasarea norului radioactiv este determinată de câmpul de viteze al vântului. Pălăria ciupercii este, la început, un puternic vârtej toroidal, a cărui rotație se încetinește treptat, pe măsură ce se înalță. Pentru bomba „standard”, în finalul dezvoltării norului radioactiv, grosimea pălăriei atinge ~ 3.000 m. În condiții normale, norul radioactiv ajunge în straturile inferioare ale stratosferei, atingând înălțimi de $9.000 \div 12.000$ m (sau mai mici dacă energia bombei este mai mică).

Caracterul „piciorului ciupercii” depinde de tipul exploziei. Dacă explozia se produce la altitudini mari, ciuperca practic nu are picior, deoarece nu intră nimic de la suprafața pământului în norul radioactiv. Ceea ce se vede ca picior este un nor de apă, radioactiv, format pe urma balonului de foc. În cazul exploziilor joase sau la sol, în picior sunt antrenate substanțe de la sol, rocă, etc.

După formarea sa, comportarea norului radioactiv este determinată de „roza vânturilor” (câmpul de viteze al vântului la data și locul respectiv) care transportă și împrăștie norul, de distribuția după mase a particulelor din nor și de viteza de depunere a particulelor.

Acțiunea vântului constă, în esență, în deplasarea particulelor pe orizontală în direcția și cu viteza vântului care domină în stratul respectiv. La altitudini diferite, direcția și viteza vântului sunt diferite, fapt care are ca efect extinderea norului și chiar ruperea lui în câțiva nori mai niți.

Gradienții orizontali și verticali ai vântului, împreună cu difuzia și căderea particulelor conduc la o expansiune extrem de rapidă a norului radioactiv, atât pe verticală cât și pe orizontală. După câteva zile, timp în care norul continuă să crească, rolul micilor vârtejuri care produceau difuzia este preluat de cicloni și anticicloni, care pot fi urmăriți pe hărțile sinoptice.

În general, drumul parcurs de un nor radioactiv din momentul exploziei până la orice moment dat, ulterior exploziei, poate fi calculat cu o precizie destul de bună pe baza datelor privind puterea bombei, locul și momentul exploziei, și pe baza datelor meteorologice. În tot acest timp, el pierde din radioactivitate pe mai multe căi: dezintegrarea radioactivă, căderi radioactive, spălarea norului radioactiv de substanțele radioactive de către precipitațiile atmosferice care traversează norul radioactiv. Astfel, cea mai mare parte a substanțelor radioactive este adusă și distribuită treptat pe suprafața pământului, pe plante, pe sol, în apă, în aer, pe animale și oameni.

Substanțele radioactive din norul radioactiv devin surse de iradiere internă și externă pentru ființele vii aflate în drumul său.

Iradierea externă se produce:

- ☐ în timpul trecerii norului radioactiv;
- ☐ după depunerea substanțelor radioactive pe pământ sau pe pielea ființelor vii.

Iradierea internă se produce prin:

- inhalarea particulelor de aerosol;
- prin ingerarea (înghițirea) substantelor radioactive care cad.

În fiecare caz au loc iradierii α , β și γ , dar în toate cazurile predomină iradierile β și γ .

În fig. 15.8 este marcat drumul parcurs de norul radioactiv format în urma exploziei experimentale în atmosferă de la 1 aprilie 1952 - Nevada (SUA), prima dintr-o serie de 8 explozii experimentale efectuate între 1 aprilie - 5 iunie 1952 în acest loc.

La o explozie de putere mică și de joasă altitudine în atmosferă, majoritatea căderilor radioactive sunt locale, dar o parte din nor ajunge sus, în troposferă, unde ploaia, zăpada și ceața îl colectează și îl depozitează în jurul Pământului, într-o bandă largă în latitudine, iar căderile radioactive durează circa o lună.

În cazul unei explozii puternice, norul ajunge în stratosferă unde rămâne un timp, rotindu-se în jurul Pământului într-o bandă de latitudini mai largă decât la explozia de putere mică. Căderile radioactive apar gradat și durează de la câteva luni până la circa zece ani, în funcție de latitudinea la care a avut loc explozia, de anotimp, de altitudinea la care a ajuns norul radioactiv.

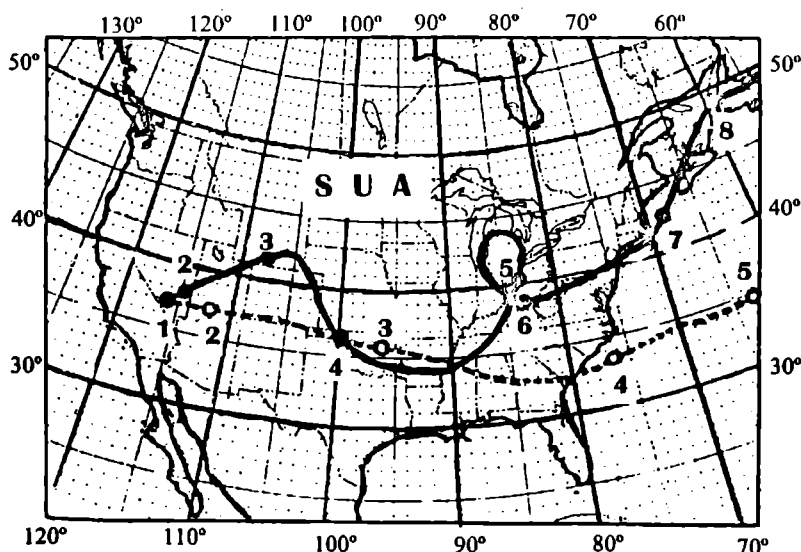


Figura 15.8: Drumurile parcurse de două fragmente din norul radioactiv format în urma exploziei atomice din Nevada, la 1 aprilie 1952 (dupa ref.[28])
(cifrele indică data din luna aprilie).

În cazul exploziilor subterane sau subacvatice, o parte din substanțele radioactive ajung în atmosferă, dar compoziția norului radioactiv și a căderilor radioactive corespunzătoare este diferită de cea a căderilor din cazul exploziilor din atmosferă, deoarece o parte consistentă a radioactivității rămâne sub pământ sau sub apă.

15.6. INTERZICEREA EXPERIMENTĂRII BOMBELOR NUCLEARE ÎN ATMOSFERĂ, SUB APĂ ȘI ÎN COSMOS

Începând cu al cincilea și al șaselea deceniu, populația globului, în întregul ei și fiecare dintre noi, a fost supusă iradierii de la produsele radioactive - depuneri rezultate din exploziile nucleare experimentale.

Experimentarea bombelor nucleare s-a realizat cu maximă intensitate în perioadele 1954-1958, când exploziile au fost produse de Anglia, SUA și fosta URSS și 1961-1962, când au fost efectuate în special de SUA și URSS. În fig. 15.9 este prezentată situația exactă a testelor efectuate în atmosferă până în 1980. În primul interval, cele mai multe experimente au fost efectuate de SUA, iar în al doilea de fosta URSS.

Aceste țări au semnat în 1963 o înțelegere privind limitarea testelor nucleare, obligându-se să nu mai producă explozii nucleare în atmosferă, în cosmos și sub apă. De atunci, numai Franța și China au mai efectuat o serie de explozii nucleare în atmosferă, dar puterea bombelor experimentale a fost substanțial mai mică, iar experimentele înseși au fost foarte rare (ultimele: Franța - 1995, India - 1998, Pakistan - 1998). Exploziile subterane se experimentează și în prezent, dar ele nu mai sunt însoțite de căderi (depuneri) radioactive.

Depunerile radioactive conțin câteva sute de radionuclizi, dar majoritatea lor se află în concentrații extrem de mici sau se dezintegrează foarte rapid. Contribuția esențială la iradierea omului o dau numai câțiva radionuclizi.

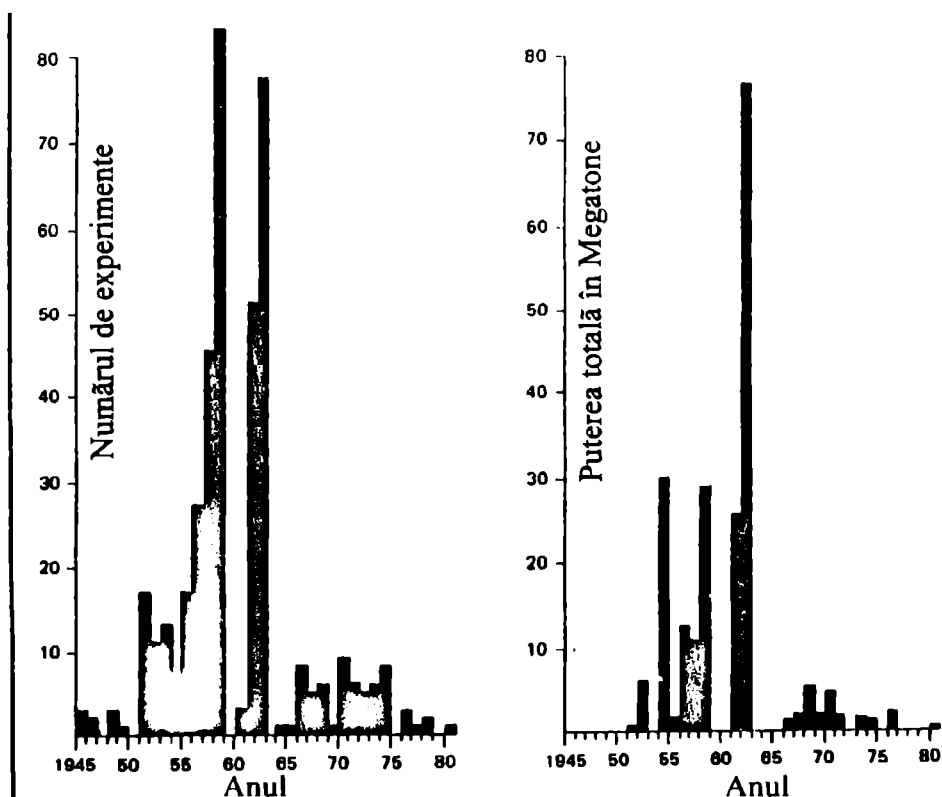


Figura 15.9: Situația testelor nucleare efectuate până în 1980 în atmosferă (ref.[14])

O estimare a dozei colective EDE așteptată arată că patru izotopi dau contribuții mai mari de 1 % la această doză: ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr și ^{90}Sr . Contribuțiile relative ale acestor izotopi radioactivi artificiali diferă în funcție de timp datorită perioadelor de înjumătățire foarte diferite. Astfel, după 64 de zile ^{95}Zr este complet dezintegrat, ^{137}Cs și ^{90}Sr au perioadele de înjumătățire de ordinul a 30 de ani și vor da contribuție la iradiere până la sfârșitul acestui mileniu. Numai ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ ani) va rămâne ca sursă radioactivă (dar cu putere mică a dozei) până într-un viitor îndepărtat: până în anul 2000, el va pierde doar 7 % din cantitatea totală produsă prin exploziile nucleare efectuate în atmosferă.

Dozele anuale de iradiere sunt clar corelate cu testele nucleare efectuate în atmosferă, după cum se observă în figura 15.10. Maximele lor sunt observate în aceleași perioade. În figura 15.11 este ilustrată corelarea dintre puterea totală anuală a exploziilor nucleare și conținutul de ^{137}Cs în diferite alimente.

În anul 1963, doza medie anuală colectivă legată de testele nucleare reprezenta 7 % din doza de iradiere de la sursele naturale. În 1966, ea s-a redus la 2 %, la începutul anilor 80 era 1 %, iar în 1985 se ajunsese aproape la normalizarea radioactivității mediului.

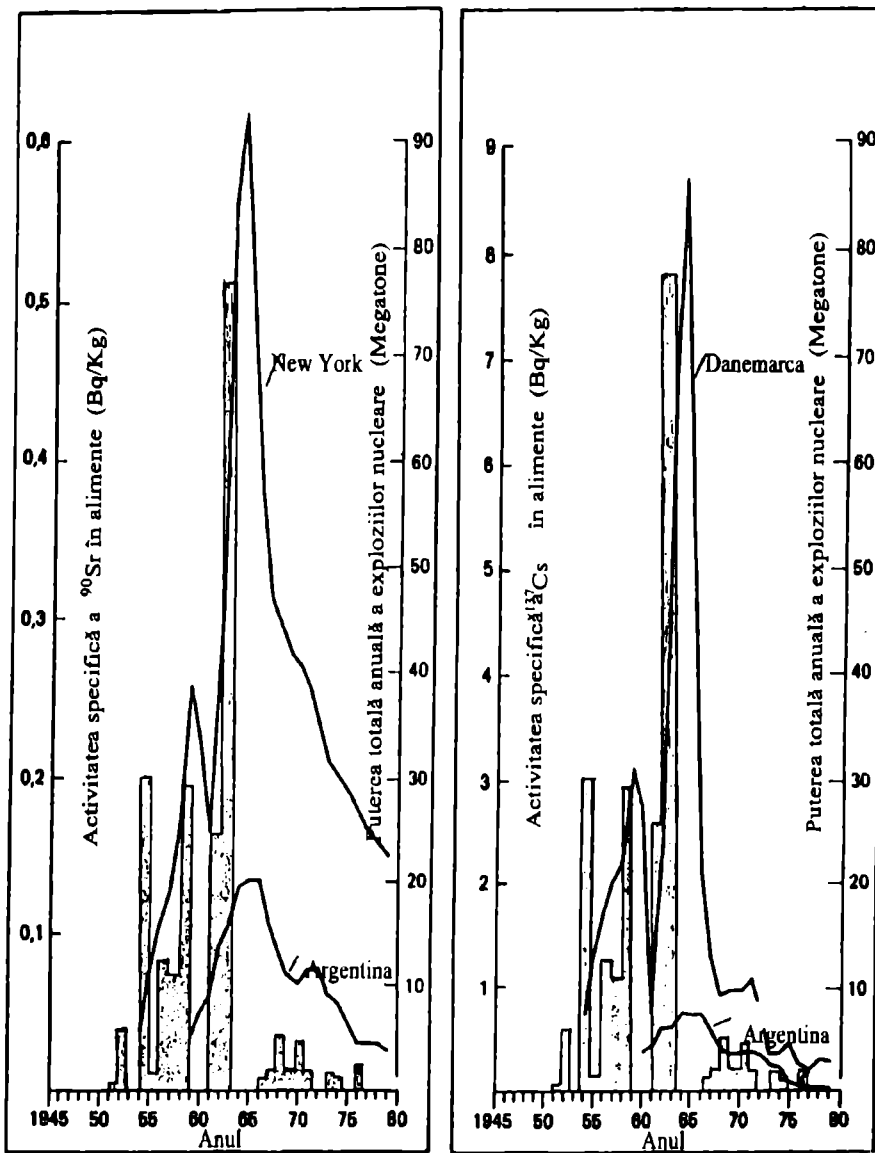


Figura 15.10: Dozele anuale de iradiere corelate cu testele nucleare (dupa ref.[14])

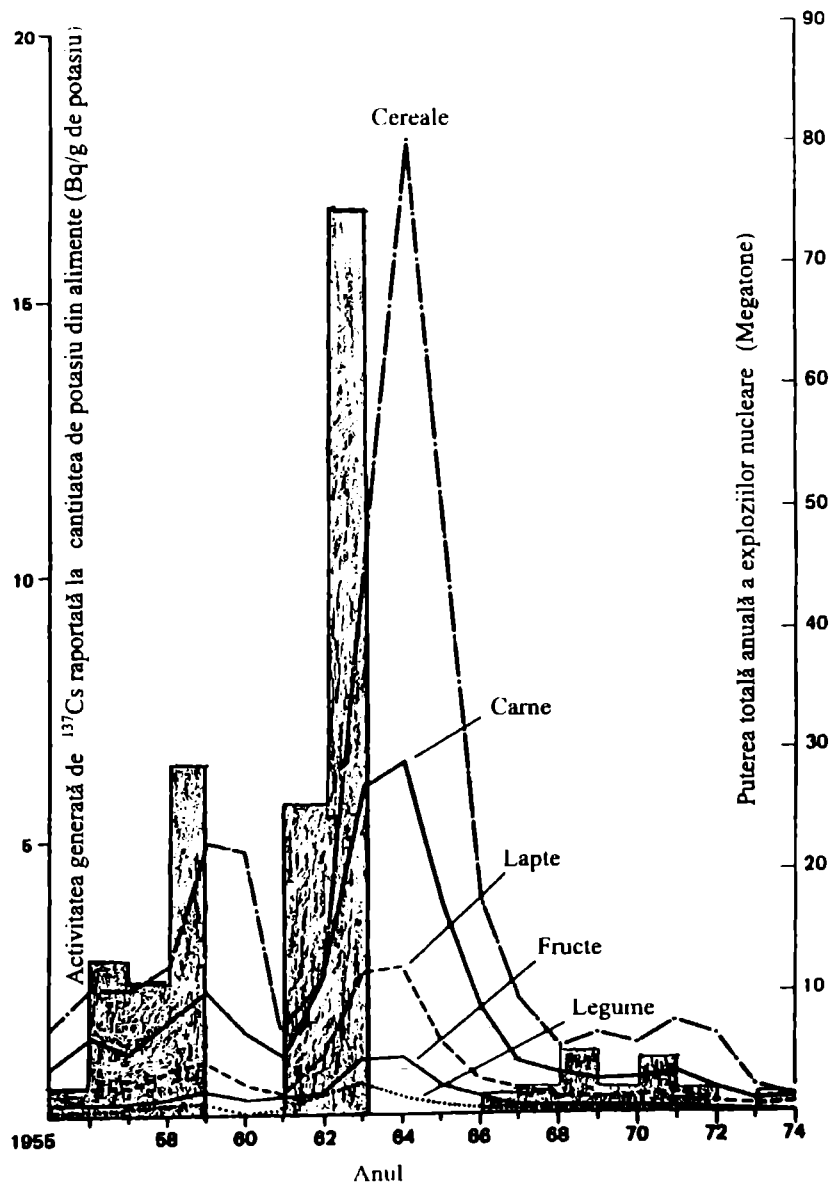


Figura 15.11: Corelația între puterea totală anuală a exploziilor nucleare și conținutul de ^{137}Cs în diferite alimente (Danemarca, după ref.[13])

CAPITOLUL 16

IZOTOPI RADIOACTIVI ARTIFICIALI ȘI CIRCUITUL LOR ÎN MEDIU

16.1. POLUAREA RADIOACTIVĂ A MEDIULUI CU IZOTOPI RADIOACTIVI ARTIFICIALI

Prezența radionuclizilor artificiali (de fisiune, de activare sau produși în alte reacții nucleare) în mediu este semnul contaminării radioactive a mediului produse de om.

Sursele de contaminare radioactivă sunt:

- explozii nucleare;
- manufacturarea și procesarea combustibilului nuclear;
- operarea reactorului;
- accidentul nuclear;
- depozitarea deșeurilor radioactive;
- utilizarea surselor nucleare de energie la vehicule spațiale (rachete, sateliți), submarine, spărgătoare de gheață, etc.;
- utilizarea izotopilor radioactivi artificiali în diverse domenii: meteorologie, hidrologie, agricultură, medicină, etc.

În toate cazurile de contaminare, obiectivul principal îl constituie stabilirea legăturilor dintre mărimea și sursa contaminării și prejudiciile ce pot fi cauzate populației umane. În acest sens, a devenit necesară supravegherea radioactivității mediului, care cere să se monitorizeze mediul, să se cunoască sau să se anticipeze injecțiile de izotopi radioactivi în mediu, să se cunoască măsurile ce trebuie luate pentru reducerea expunerii omului. De asemenea, se cere cunoașterea proprietăților fizico-chimice ale radionuclizilor, a transportului lor fizic în atmosferă și în mediul acvatic, migrarea în sol și în hrana omului, pătrunderea și retenția în organismul uman și, în final, efectele biologice asupra omului. Toți acești factori determină importanța potențială a fiecărui radionuclid.

Dintre sursele de contaminare radioactivă enumerate, norii radioactivi formați în urma exploziilor nucleare și în caz de accident nuclear constituie principalele surse de contaminare a unor zone foarte largi de pe planetă. Injecția de ioni în stratosferă prin explozii nucleare este urmată de căderi radioactive stratosferice pe întreaga suprafață a planetei, timp de câțiva ani de la explozie.

Injecția de ioni în troposferă este urmată de căderi radioactive troposferice într-o bandă neregulată, cam la aceeași latitudine cu punctul de detonare, timp de aproape o lună de la explozie.

În cei aproape 200 de radionuclizi din norii radioactivi sunt incluși izotopi radioactivi din materialul original fisionabil, izotopi radioactivi artificiali rezultați din fisiune și izotopi radioactivi artificiali formați prin activarea cu neutroni a diferitelor materiale.

De asemenea, în unele experimente s-au introdus, în mod deliberat, în structura bombelor, radionuclizi cu scopul de a fi folosiți în studiul circulației meteorologice.

Istoria vieții unui radionuclid artificial de la sursă la om depinde de:

- cantitatea de radionuclid produs;
- cantitatea de radionuclid care a ajuns în mediu;
- perioada de înjumătățire, schema de dezintegrare, energiile radiațiilor emise (radiotoxicitatea și toxicitatea chimică);
- căile de transfer din mediu în organismul uman și factorii de concentrare corespunzători;
- metabolizarea și organele critice care-l acumulează în corpul uman;
- perioada de înjumătățire biologică, căi de eliminare.

16.2. IRA ÎN ATMOSFERĂ, TRANSPORTUL ȘI TRANSFERUL LOR

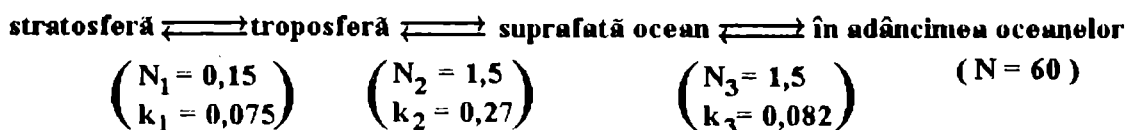
De la începutul erei nucleare s-a modificat treptat conținutul de ^{14}C , ^3H , ^7Be în atmosferă: la cantitățile produse zilnic de radiațiile cosmice în atmosferă, s-au adăugat cantitățile produse pe cale artificială și eliberate în atmosferă.

Carbonul ^{14}C ($T_{1/2} = 5700$ ani) produs pe cale artificială provine, în cea mai mare parte, din experimentele nucleare și de la centralele nucleare electrice (cu moderator de grafit) în caz de accident nuclear și se adaugă celui produs în atmosferă în mod natural, sub acțiunea razelor cosmice.

Carbonul ^{14}C din atmosferă se află aproape integral sub formă de bioxid și este folosit de plantele terestre în fotosinteză, devenind incorporabil pentru toate ființele vii. De aceea, conținutul de ^{14}C în carbonul din verigile lanțurilor alimentare este reflecția conținutului acestui radionuclid în carbonul atmosferic.

Conținutul de ^{14}C natural în întreaga atmosferă a fost evaluat, înainte de „epoca” experimentelor nucleare, ca fiind de circa $4 \cdot 10^{28}$ atomi, iar activitatea specifică a unui lemn standard era de 14,5 dezintegrări pe minut pe gram de carbon (cenușă de lemn proaspăt). Odată cu începerea experimentelor nucleare, a crescut conținutul de carbon ^{14}C din atmosferă. Astfel, în anul 1955, activitatea specifică a bioxidului de carbon din troposferă a crescut cu câteva procente, iar în 1959 era deja mai mare cu 30 % față de nivelul natural. S-a prezis pentru anii 1964 ÷ 1965, o creștere cu circa 70 %, reprezentând un maxim al abundenței ^{14}C artificial în atmosferă, urmată apoi de o scădere treptată: nivelul de 60 % peste normal este atins în circa 7 ÷ 8 ani, iar nivelul de 3 % peste valoarea normală în următorii 70 de ani (1970 ÷ 2040).

Aceste preziceri s-au făcut folosindu-se un model cu patru compartimente între care are loc transferul de ^{14}C produs artificial, după schema:



unde coeficienții N_i ($i = 1,2,3$) reprezintă concentrația de ^{14}C a compartimentului „i” raportată

la concentrația atmosferică medie a ^{14}C , iar k_1 este factorul de transfer anual al ^{14}C definit ca raportul dintre cantitatea de ^{14}C transferat și cantitatea de ^{14}C din atmosferă.

În acest model, carbonul din biosferă (substanța vie) a fost inclus în carbonul atmosferic, iar cel din humus (substanța organică din sol) a fost inclus în carbonul din adâncul oceanelor datorită similitudinii factorilor de transfer.

Tritiul ^3_1H ($T_{1/2} = 12,5$ ani) produs și eliberat în atmosferă prin explozii termonucleare se oxidează și, sub formă de apă supergrea, intră în circuitul din mediu. Înainte de experimentele nucleare, nivelul de tritium în apa de ploaie era de $1 \div 10$ UT (unități de tritium) și era generat de razele cosmice. Între anii 1953 ÷ 1963, valorile au fluctuat în jurul a 100 UT în emisfera nordică și în jurul a 5 ÷ 20 UT în emisfera sudică.

Beriliul ^7Be ($T_{1/2} = 54$ zile) a fost, de asemenea, detectat în aer și în apa de ploaie ca rezultat al testelor din anii 1961 ÷ 1962.

O serie de alți nuclizi, produși prin activarea cu neutroni sau adăugați în mod deliberat printre materialele de construcție ale bombelor testate, au fost identificați în atmosferă și în precipitații și au fost folosiți pentru studiul circulației meteorologice: ^{181}W (145 zile); ^{185}W (74 zile); ^{102}Rh (210 zile); ^{54}Mn (310 zile); ^{55}Fe (980 zile); ^{124}Sb (60 zile); ^{88}Y (104 zile); ^{58}Co (72 zile); ^{22}Na (2,6 ani); ^{210}Pb (20 ani) și ^{65}Zn (245 zile).

De asemenea, au fost identificați în atmosferă izotopi ai plutoniului (proveniți atât de la testele nucleare, cât și de la sursele de energie nucleară ale sateliților spațiali care au explodat ori au ars în atmosferă), precum și izotopi radioactivi artificiali rezultați din fisiunea uraniului și a plutoniului.

Odată eliberați în atmosferă, izotopii radioactivi artificiali aflați sub formă de gaz, vapori de apă tritiată, aerosoli, sunt amestecați cu celelalte componente ale atmosferei, diluați și dispersați în special prin fenomenul de difuzie turbulentă.

Evoluția în timp și spațiu a unui radionuclid artificial eliberat în atmosferă poate fi studiată teoretic folosind ecuațiile matematice de difuzie, specifice dinamicii atmosferice. De asemenea, se fac studii experimentale care constau în măsurări ale concentrației radionuclizilor în diferite puncte de observare situate la diferite distanțe (altitudini, longitudini și latitudini) față de sursa lor și la diferite momente de timp după emisie.

La diluarea izotopilor radioactivi artificiali din atmosferă contribuie depunerea uscată sau umedă a aerosolilor pe suprafața pământului. În cazul căderilor uscate, aerosolii radioactivi vin în cădere liberă prin aer spre Pământ. Mișcarea de coborâre a aerosolilor prin atmosferă depinde de densitatea și dimensiunea particulelor, de forma lor. Aerosolii antrenati de masele de aer turbulente care vin în contact cu o suprafață solidă au tendința de aderare (lipire) la aceste suprafețe (sol, vegetație, construcții, animale).

Fenomenul este caracterizat prin „viteza de depunere” v_d definită ca raportul:

$$v_d = \frac{\text{cantitatea de aerosoli depusă} / \text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{cantitatea volumetrică} / \text{m}^3 \text{ dea sup ra sup rafetei}} \quad (16.2.1)$$

Măsurătorile efectuate arată că aerosolii de ^{131}I au o viteză medie de depunere de circa 1 cm/s , care este de câteva ori mai mare decât a aerosolilor de ^{137}Cs . O altă observație este legată de faptul că depunerea se face mult mai rapid pe suprafețele acoperite cu vegetație (iarbă, tufișuri) decât pe suprafețele libere.

În cazul depunerilor umede, aerosolii radioactivi sunt antrenați de picăturile de ploaie sau de fulgii de zăpadă și ajung împreună la suprafața pământului.

Un alt aspect al radioactivității „aeropurtate” îl constituie posibilitatea ca particulele depozitate la sol să fie din nou ridicate în atmosferă și transportate datorită vântului. Izotopii radioactivi artificiali din atmosferă sfârșesc oricum prin transferul lor din atmosferă către alte componente ale mediului în general, și către organismele vii în particular, intrând în circuitele biogeochimice din biosferă.

O parte din radionuclizii care contaminatează atmosfera pătrund direct în organismele vii (inhalare sau contact direct), în timp ce o altă parte a lor ajunge mai întâi pe sol sau în apă, prin hrană și apa de băut și prin diverse lanțuri trofice, ajung în organismele vegetale și animale și în organismul uman.

Un model al transferului izotopilor radioactivi artificiali din atmosferă către om este dat în fig. 16.1.

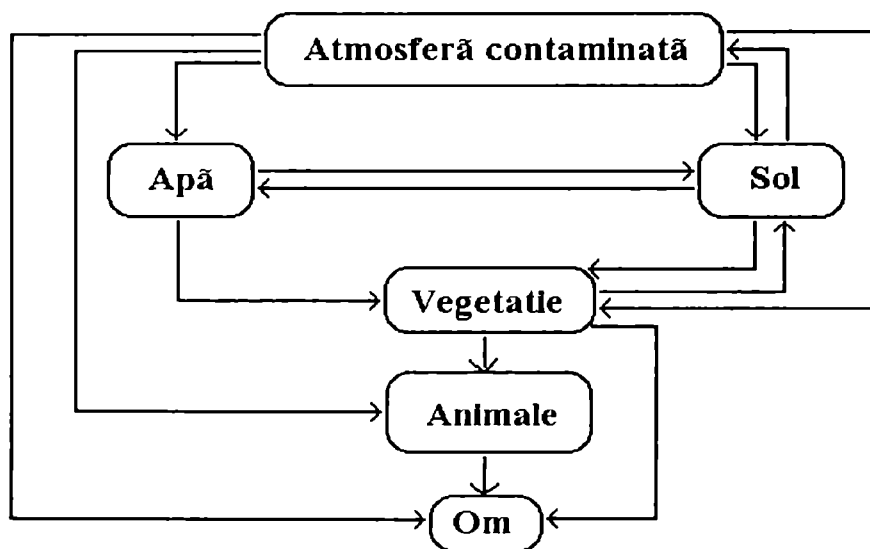


Figura 16.1: Schemă de transfer al radionuclizilor artificiali din atmosferă spre om

Lanțurile de acces ale izotopilor radioactivi artificiali din atmosferă spre om sugerează dozele ce trebuie evaluate în cazul eliberării de materiale radioactive în atmosferă și a riscului la care este expusă populația:

- iradiere (doză) externă β și γ de la norii radioactivi trecători;
- iradiere (doză) externă γ provenită de la depunerile radioactive la suprafața pământului;
- iradiere (doză) internă a plămânului și a altor organe critice prin inhalarea aerului;
- doza potențială pentru tiroidă generată de ^{131}I din depunerile pe suprafețe;
- iradierii și doze datorate radionuclizilor care pot fi încorporați prin lanțurile trofice din apa potabilă și hrană.

În evaluarea iradierilor (dozelor) provocate de un nor radioactiv trecător trebuie să se țină seama de izotopii radioactivi prezenți în nor, de timpul lor de înjumătățire, de cantitatea de material radioactiv din nor, de altitudinea la care trece, de viteza de deplasare, etc.

Dacă sunt prezenți în nor izotopi radioactivi artificiali cu perioada de înjumătățire mai scurtă sau comparabilă cu timpul de tranzit al norului, concentrația acestora în nor scade exponențial în timpul trecerii pe deasupra unui obiectiv dat și la calculul dozelor trebuie să se țină cont de acest fenomen, printr-un factor exponențial care înmulțește concentrația sau activitatea specifică.

16.3. TRANSPORTUL ȘI TRANSFERUL RADIONUCLIZILOR DIN MEDII ACVATICE

Radionuclizii artificiali ajunși în mediul marin sunt supuși, în esență, la două acțiuni: pe de o parte, dispersia și diluarea în apa mării, iar pe de altă parte, fixarea pe diferiți suporti din mediul marin (suspensii minerale sau organice, sedimente, organisme vii). În general, o serie de fenomene complexe, de natură fizică și biologică își aduc contribuția la răspândirea izotopilor radioactivi artificiali, iar rezultanta lor este importantă din punct de vedere al protecției mediului.

Pentru stabilirea unei relații cantitative între un aport dat de radionuclizi (sau un debit X (Ci /zi) și repartizarea lor ulterioară (în pCi /unitatea de masă sau volum) între diferiții constituenți ai mediului marin trebuie să se țină cont de contribuția a patru factori:

- nivelul (rezerva) de radioactivitate al fiecărui constituent al mediului marin;
- transferul de izotopi radioactivi artificiali de la un constituent la altul;
- transportul la distanță al izotopilor radioactivi artificiali fixați pe diferiți suporti care se deplasează în mediu;
- dezintegrarea radioactivă.

În general, după accesul contaminantului radioactiv în mediul marin are loc, într-o fază inițială, o dispersie a radionuclizilor în mediul apos. Urmează apoi o fază de fixare pe diferiți suporti din mediu, caracterizată cantitativ prin activitatea specifică $\Lambda = \frac{\Lambda_S}{m}$ ($\mu\text{Ci/kg}$)

sau prin valoarea relativă $\frac{\Lambda_S^{(\text{suport})}}{\Lambda_S^{\text{apă ambiantă}}}$.

Dacă poluantul e o suspensie solidă, se va depune pe fundul apei. Poluanții în soluție pot fi absorbiți de suspensii organice sau minerale sau pot fi asimilați de plante și animale marine.

Pentru a facilita supravegherea nivelului de radioactivitate a mediului marin se alege ca „suport indicator” suportul care are cea mai mare putere de concentrare (acumulare) pentru izotopii radioactivi dați (de ex. anumite specii de alge, suspensii fine, etc.).

De asemenea, este foarte important nivelul de radioactivitate al componentelor din mediul marin care servesc drept hrană omului (specii comestibile care contribuie la iradierea internă a acestuia). Fixarea izotopilor radioactivi pe suporti de tipul sedimentelor sau a algelor necomestibile poate fi favorabilă din punct de vedere sanitar, deoarece limitează transferul acestora către om. Ei rămân însă surse de iradiere externă pentru corpurile scufundate în apă (pescuit subacvatic, plajă, etc.). Când crește turbulența apei, izotopii radioactivi artificiali din sedimente sunt antrenati în sus și crește concentrația lor în apă.

Transferul între constituenți marini se desfășoară în două etape:

☐ un transfer primar - de la apă la diferiți alți constituenți marini

și

☐ transferuri secundare, de tipul

- de la sediment la speciile care trăiesc pe fundul apei;
- de la organism la organism (lanțuri trofice care cuprind specii consumatoare și specii consumate);
- în interiorul aceluiași organism, prin metabolizare, de la penetrarea izotopilor radioactivi artificiali până la eliminare;
- revenirea în mediul ambiant a izotopilor radioactivi artificiali eliberați din organismele moarte.

Toate aceste transferuri presupun un timp de tranzit, mai lung sau mai scurt, și sunt caracterizate prin factori de transfer (FT) și factori de concentrare (FC) care depind de natura constituenților, a radionuclidului considerat și a condițiilor de mediu.

Prin diminuarea radioactivității mediului ambiant (apa) se diminuează și radioactivitatea celorlalți constituenți.

Cel mai important factor pentru transferul radionuclizilor este apa, care realizează acest transport prin difuzie turbulentă și prin curenți, favorizând diluția izotopilor radioactivi artificiali. Prin mișcarea ei, apa poate antrena sedimentele, suspensiile și organismele vii care o populează și odată cu acești componenți antrenează radionuclizii fixați pe ei.

Profilul pe verticală al apei de mare din largul oceanelor relevă existența unor straturi ale căror proprietăți diferă de la un strat la altul:

○ stratul superficial, a cărui adâncime variază de la 10 la 200 m, în care sub influența vântului apele se amestecă rapid și complet (stratul de amestec); în acest strat, caracteristicile apei, cum sunt salinitatea, densitatea și gradientii verticali ai temperaturii, sunt aproape uniforme;

○ stratul intermediar, dintre apa de suprafață și apa de adâncime, în care temperatura descrește, iar salinitatea și densitatea cresc cu adâncimea; această zonă se întinde până la circa 1.000 m adâncime și se numește zonă termoclină;

○ apa de adâncime formează stratul cel mai gros și conține aproximativ 75 % din masa apei oceanului; în această zonă apele sunt reci (circa $1^{\circ} - 4^{\circ}$), iar salinitatea este de 3,47 %;

○ stratul de frecare este stratul de interfață cu fundul oceanului și are circa 20 – 50 m grosime.

Poluanții pot fi introduși fie în stratul de suprafață, fie în adâncul oceanului, de unde vor difuza atât pe verticală (în sus sau în jos), cât și pe orizontală (în toate direcțiile).

Curenții oceanici din stratul de amestec (de suprafață) sunt generați de vântul care suflă în vecinătatea suprafeței oceanului și reflectă caracteristicile acestuia (direcție, viteză, etc.).

Studiul difuziei poluanților radioactivi pe verticală și pe orizontală în stratul de amestec a condus la câteva concluzii:

- viteza de difuzie pe orizontală este mult mai mare (de mii de ori) decât viteza de difuzie pe verticală;
- difuzia pe orizontală se face pe am oricât de extinse, în funcție de timpul scurs de la injecție și de viteza de difuzie pe orizontală;

- difuzia pe verticală conduce la o acumulare a radionuclizilor în zona termoclină (după circa 48 de ore de la eliberarea de izotopi radioactivi artificiali la suprafața apei);
- coeficienții de difuzie pe verticală au cea mai mare valoare în stratul de amestec ($50 \div 500 \text{ cm}^2/\text{s}$).

Difuzia în stratul de frecare se realizează cu o viteză de difuzie de ordinul vitezei difuziei moleculare.

Dacă substanța radioactivă este dizolvată pe fundul oceanului (de exemplu, din depozitul de deșeuri depus pe fundul oceanului), ea va migra pe verticală în sus. Viteza de ascensiune mică estimată la circa 5 m /an, face ca ascensiunea de la adâncimea de 4.000 m la cea de 1.000 m să dureze circa 600 ani.

Studiul difuziei pe orizontală în straturile adânci a condus la valori de circa $10^{-1} \div 10^{-4} \text{ m/s}$, de asemenea mult mai mici decât în stratul superficial și în cei 600 ani de ascensiune pe verticală vor difuza pe orizontală pe distanțe de ordinul a zeci de mii de km.

Poluanții ajunși din adânc la baza stratului intermediar (termoclin) la circa 1.000 m adâncime, unde apa este returnată spre straturile din adâncime vor fi antrenați de aceasta și se reamestecă cu contaminanții de pe fundul apei..

În zona litorală, apele sunt puțin adânci, dar de mare importanță din punct de vedere al probabilității de contaminare (deversarea de ape uzate de la centralele nucleare electrice și a apelor din circuitele de răcire).

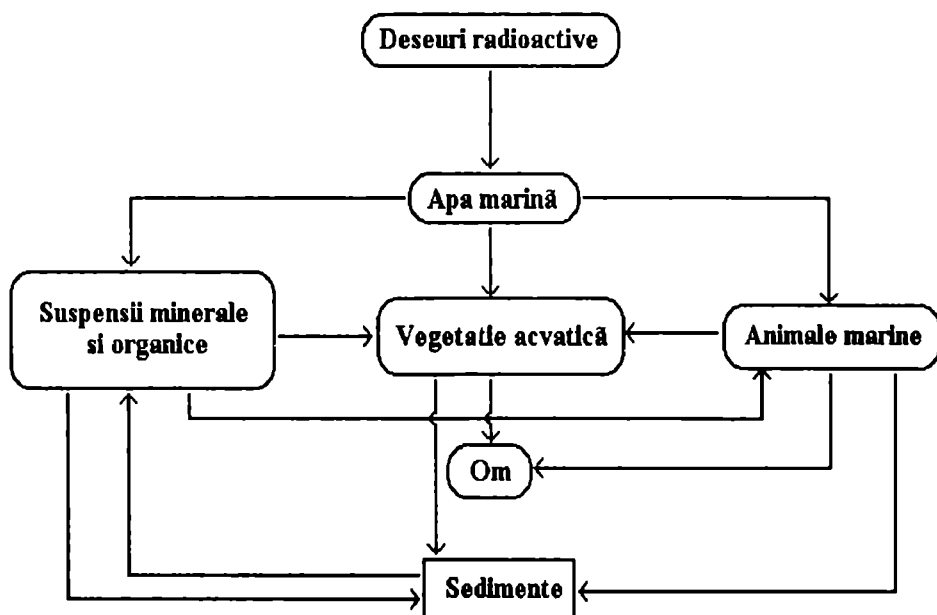


Figura 16.2: Schemă de transfer al radionuclizilor din mediul marin către om

Râurile pot fi contaminate radioactiv, în special dacă se află în vecinătatea vreunei CNE, prin preluarea efluenților lichizi care conțin izotopi radioactivi artificiali. Acești izotopi radioactivi artificiali sunt supuși difuziei turbulente și sunt transportați pe distanțe mari pe cursul râului. O dată ajunși în apa de râu, ca și în mări și oceane, izotopii radioactivi

artificiali se distribuie între componentele apei de râu: apă, organisme vii, nămol, cu posibilități de transfer de la o componentă la alta.

Transferul izotopilor radioactivi artificiali din mediul marin către om se face prin hrana vegetală și animală și este reprezentată schematic în fig. 16.2.

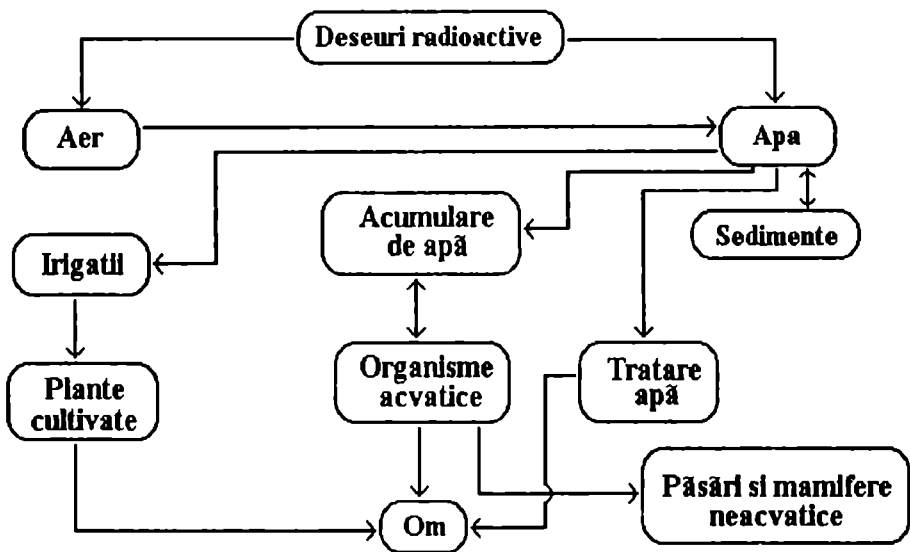


Figura 16.3: Variantă a schemei de transfer al izotopilor radioactivi artificiali în mediul acvatic

Tabelul 16.1: Factorii de concentrare ai celor mai importanți izotopi radioactivi artificiali în diferite componente ale mediilor acvatice

IRA	Ecosisteme marine					Ecosisteme dulcicole	
	alge	crustacei	moluște	pești	sedimente	sedimente	pești
³ H	1	1	1	1	0	0	1
¹⁴ C	4000	5000	5000	5000	100	2000	5000
⁹⁰ Sr	10	10	10	1	500	2000	30
¹³¹ I	1000	100	100	10	100	200	30
¹³⁷ Cs	30	30	30	50	500	30000	1000
²³⁹ Pu	1000	100	1000	10	50000	30000	10
²⁴¹ Am	2000	200	2000	10	50000	30000	30

Transferul izotopilor radioactivi artificiali din apele dulcicole și marine către om se poate realiza și conform variantei din fig. 16.3.

Concentrarea elementelor chimice, deci și a izotopilor radioactivi artificiali de către organismele acvatice este foarte diferită, după cum se observă în tabelul 16.1, în care se dau factorii de concentrare FC (definiți ca raportul dintre activitatea specifică (în Bq /kg) a organismului viu sau a sedimentului uscat și activitatea specifică a apei filtrate).

Toți factorii de concentrare din acest tabel sunt supraunitari, cu excepția factorilor de concentrare pentru tritium (³H).

Organismele acvatice acumulează din mediul înconjurător izotopi radioactivi artificiali și îi concentrează. Prin consumul lor de către om, acesta primește „concentrate” de ^{131}I (alge, crustacei, moluște), ^{137}Cs (pești), ^{239}Pu (moluște), etc., care devin surse de iradiere internă a organismului său.

16.4. TRANSPORTUL ȘI TRANSFERUL IRA DIN MEDIUL TERESTRU

Cele mai multe alimente consumate de către om cresc pe sol, iar contaminarea pe o cale sau alta a acestuia determină contaminarea verigilor din lanțurile trofice care încep la sol și se termină la om.

Solul poate fi contaminat pe două căi majore:

- a) depuneri radioactive direct pe suprafața solului;
- b) contaminarea solului prin utilizarea la irigații a apelor din canalele, râurile sau bazinele în care au fost deversați efluenți radioactivi proveniți din apa de răcire de la CNE și de la stațiile de tratare a deșeurilor radioactive.

În general, comportarea și transportul radionuclizilor din sol depind de structura fizico-chimică a acestuia (componentele minerală și organică, umiditate, aerare, granulație, etc.).

Principalele fenomene relevante în migrarea radionuclizilor prezenți în și pe sol sunt:

- resuspensia de sol care duce la împrăștierea contaminării pe distanțe mari, cu efecte asupra părții aeriene a etajului vegetal și inhalarea de către om;
- scurgerile și spălările de sol radioactiv în apa de suprafață cu potențial de contaminare a surselor de apă potabilă;
- încorporarea în plante prin rădăcini;
- ingerarea de plante și sol contaminate de către animalele ierbivore (câi de contaminare a verigilor din lanțurile trofice ale omului);
- migrarea radionuclizilor de la suprafață pe verticală, în profunzimea solului.

Profilul în plan vertical al solului arată o structură formată din trei straturi orizontale (sau orizonturi) care diferă între ele prin caracteristici fizico-chimice care, în ultimă instanță, determină varietatea și cantitatea de vegetație pe care o întreține. Acestea sunt:

○ stratul superficial, cuprins între suprafața solului până la adâncimi ce variază între 30 ÷ 60 cm. Aici au loc cele mai multe procese biologice și există cea mai mare cantitate de substanță biologică;

○ stratul intermediar, situat între limita inferioară a stratului superficial și adâncimi de circa 90 cm față de suprafața solului;

○ stratul liber, situat între stratul intermediar și până la adâncimi în sol, de circa 1,5 m, format numai din fragmente de rocă; acest strat este sursa componentei minerale a solului.

Componenta anorganică a solului, formată din nisip (granule cu dimensiuni 50 μm – 2 mm), nămol (minerale cu dimensiuni de 2 μm ÷ 50 μm) și argilă (minerale cu dimensiuni sub 2 μm) variază de la un sol la altul prin ponderile relative ale celor trei componente.

Componenta de tip argilă a solului joacă un rol important în procesele fizico-chimice prin care solul hrănește plantele. La baza acestui rol se află capacitatea granulelor de argilă de a adsorbi ioni pozitivi la suprafața lor, măbind cantitatea de elemente nutritive, depozitate pe timp îndelungat în sol

Elementele hrănitoare dizolvate în apă au un timp de staționare în sol mai scurt.

Un alt fenomen important care are loc în sol este schimbul de ioni pozitivi între soluția apoasă și granulele de argilă, fenomen care conduce în timp la creșterea acidității solului (cationii adsorbiți de argile sunt înlocuiți cu ioni H^+).

Capacitatea de schimb ionic este favorizată de prezența componentei organice. De aceea, solurile nisipoase au o capacitate de schimb mai mică decât celelalte tipuri de sol.

Procesele de adsorbție ionică și de schimb ionic din sol sunt valabile și pentru ioni radioactivi prezenți în sol. Astfel, radionuclizii aflați în sol sub formă de soluție se distribuie în trei stări:

- adsorbiți la granulele de argilă;
- precipitați sub formă de acid sau hidroxid;
- rămân în soluție.

Ponderile după care nucleizii se distribuie între cele trei stări variază de la un nucleid la altul și depind de starea de valență. Ele determină durata de depozitare a radionuclizilor și viteza lor de migrare în sol.

Schimbul de ioni între sol și apă are loc în ambele sensuri. Raportul dintre activitatea specifică a fazei solide (în Bq /kg) și activitatea specifică a fazei lichide (în Bq /l) numit coeficient de distribuție (k_d) depinde de proprietățile geochemice și hidrologice ale mediilor geologice implicate și ale apei din pori.

Proprietățile geochemice importante pentru caracterizarea schimbului de ioni sunt:

- mineralogia cantitativă și calitativă a solului ;
- capacitatea de schimb cationic;
- pH-ul și potențialul redox al apei din pori;
- conținutul de cationi majori în apa din pori (Cl , HCO_3 , CO_3 , SO_4 , NO_3) și de SiO_2 .

Printre proprietățile fizice și hidrologice mai importante, se numără:

- conținutul de sediment în soluție (raportul solid/soluție);
- permeabilitatea solului;
- viteza apei;
- suprafața și distribuția granulometrică a particulelor de sediment;
- temperatura mediului;

În cazurile reale apar o serie de fenomene care complică mult problema migrării radionuclizilor în sol, astfel încât modelarea matematică întâmpină o serie de dificultăți, datorită necunoașterii unor parametri experimentali, a neomogenității lor în mediu, a lipsei unor soluții analitice, etc.

Totuși, migrarea radionuclizilor în sol privită ca un fenomen de transport-difuzie simplifică foarte mult predicția pe termen lung a comportamentului acestora în mediu. Procesul de transport-difuzie în ecosistemul terestru este foarte lent; observarea lui experimentală cere foarte mult timp și este deci impracticabilă. Apare justificat efortul de modelare matematică a comportamentului radionuclizilor în ecosistemul terestru, folosindu-se ecuația de transport-difuzie pentru toate fazele în care se află radionuclidul (dizolvat, fixat pe particule de sediment, încorporat în material biologic, etc.).

Migrarea radionuclizilor în sol are loc și pe verticală și pe orizontală, cu viteze care depind de tipul de radionuclid, de tipul de sol și de condițiile meteorologice.

Radionuclizii artificiali prezenți în sol trec în rădăcinile plantelor odată cu izotopii stabili ai elementelor respective. Ca și în cazul izotopilor radioactivi naturali, există elemente fără rol biologic (funcție metabolică) pentru plante, dar care manifestă proprietatea de concentrație grupală: dacă este prezent în sol, el va fi prezent și în țesuturile plantelor hrănite de solul respectiv (cazul radionuclizilor de cobalt și de iod).

Factorul de concentrare (FC) al unui izotop radioactiv artificial din sol în plante, depinde de compusul chimic în care se află, de rolul biologic al elementului respectiv, de caracteristicile fizico-chimice ale solului și de concentrația izotopilor radioactivi artificiali în sol. Factorul de concentrare relativă a unui izotop radioactiv artificial în planta uscată sau în sol uscat, exprimat în părți per milion (ppm) este egal cu factorul de concentrare relativă al elementului chimic corespunzător, deoarece izotopii unui element chimic sunt absorbiți nediferențiat de o plantă.

Lanțurile trofice prin care izotopii radioactivi artificiali ajung din sol în corpul omenesc pot avea una din variantele:

a) sol → plante → animale (lapte, carne) → om
sau

b) sol → plante → om

Fracțiunea de izotopi radioactivi artificiali care este transferată din sol în corpul omenesc depinde de factorii de concentrare (sau de transfer) pentru fiecare verigă a lanțului, cu referire concretă la partea plantei sau produsul animal care servește drept hrană omului (și la factorul de concentrare specific acestui produs).

Transferul ^{90}Sr prin lanțuri trofice este corelat cu transferul calciului, raportul concentrațiilor lor ($^{90}\text{Sr} / \text{Ca}$) din țesuturile și fluidele organismelor vii, fiind direct corelat cu cel din hrană.

În țesuturi și în fluidele organismului (sânge, lapte), concentrația de calciu este remarcabil de constantă, fiind controlată homeostatic. Astfel, raportul $^{90}\text{Sr} / \text{Ca}$ în țesuturile și fluidele corpului este direct corelat cu cel din hrană și pentru materiale biologice el este exprimat în pCi de ^{90}Sr pe gram de calciu.

Totuși, organismele vii acționează „discriminatoriu”, în sensul că rețin și utilizează stronțitul mai puțin efectiv decât elementul calciu.

Fiecare proces fiziologic contribuie la discriminarea globală stronțiu-calciu a unui organism. Pentru descrierea fenomenului de discriminare globală s-a introdus noțiunea de „raport observat stronțiu-calciu” (OR), definit astfel:

$$\text{OR}_{\text{probă/precursor}} = \frac{\text{Sr} / \text{Ca} (\text{probă})}{\text{Sr} / \text{Ca} (\text{precursor})} \quad (16.4.1)$$

Pentru un animal hrănit cu nutreț care conține calciu și strontiu, raportul $\text{OR}_{\text{lapte/nutreț}}$ descrie abilitatea animalului de a discrimina metabolic între stronțiu și calciu, în favoarea calciului. În organismul animal, discriminarea se face în mai multe etape, corespunzătoare diferitelor procese fiziologice metabolice prin care stronțitul și calciul ajung în lapte.

Pentru discriminarea produsă de un proces fiziologic dat, s-a introdus termenul de „factor de discriminare stronțiu-calciu” (FD), care are și o denumire specifică procesului implicat.

Raportul OR global este egal cu produsul factorilor (FD), specifici fiecărui proces individual (i) care contribuie la OR:

$$OR = \prod_i (FD)_i \quad (16.4.2)$$

La om, raportul $OR_{corp / dietă}$ are o dependență complicată de o serie de factori, cum sunt vârsta, nivelul de calciu, raportul calciu / fosfor (Ca / P) în corpul subiectului. Totuși, în cazul unei diete obișnuite, raportul $OR_{corp / dietă}$ are variații destul de mici și poate fi folosit la estimarea efectelor radiațiilor nucleare, acestea fiind, în general, caracterizate de imprecizii cu ordine de mărime mai mari.

Transferul ^{137}Cs de la sol la plante este mai puțin eficient decât al ^{90}Sr , datorită fixării cesiului în rețelele structurale ale mineralelor. În solurile tipice din zonele temperate, fracția de ^{137}Cs absorbită de plante este de circa 1 / 10 din fracția de ^{90}Sr absorbită de aceleași plante, și în timp acest raport scade și mai mult (circa 1 / 25 după 3 ani).

Întrucât cesiul ^{137}Cs nu este accesibil plantei prin rădăcini, nivelul de ^{137}Cs în hrană și în corpul omenesc trebuie să fie corelat cu rata căderilor radioactive. Unele studii efectuate asupra concentrației ^{137}Cs în laptele bovinelor și ovinelor au arătat că adăugarea de materii organice în stratul superficial al solului pășunilor poate reduce legătura ^{137}Cs în minerale, măbind posibilitatea de a fi absorbit în plante.

Migrarea pe verticală a ^{137}Cs spre straturi mai adânci de sol necultivat este mult mai lentă decât a ^{90}Sr . În 5 ani, circa 50 ÷ 80 % din ^{137}Cs depus la suprafața solului rămâne într-un strat superficial, gros de 5 cm și foarte puțin penetrează la adâncimi de peste 10 cm. Cesiul pătrunde în plante predominant prin contaminare directă, ca și ^{90}Sr , dar, spre deosebire de acesta, se redistribuie rapid în plante. Cesiul pătruns în organismele animale este absorbit eficient din traiecul gastro-intestinal și transportat (acumulat) în țesuturile musculare (moi) și în lapte. Timpul de înjumătățire biologic la animale este variabil, în funcție de tipul de animal, de vârstă, sex, etc.

Izotopii radioactivi ^{90}Sr și ^{89}Sr fac parte din radionuclizii transferabili (sunt solubili în mediul biologic), difuzează în întregul organism, dar se fixează preferențial în sistemul osos (organul critic). Radiotoxicitatea radionuclidului ^{90}Sr derivă din faptul că, fixându-se în oase și având perioada de înjumătățire efectivă mare ($T_e(^{90}\text{Sr}) = 28,8$ ani), va determina o expunere îndelungată a măduvei osoase la radiațiile β pe care le emit el și descendentul său, ^{90}Y . Eliminarea ^{89}Sr și a ^{90}Sr se face atât natural (cu $T_b = 47,50$ ani), cât și artificial. Eliminarea artificială poate fi provocată prin administrarea unor substanțe decontaminante digestive (alginat de sodiu sau fosfat de aluminiu - gel), care formează compuși stabili și insolubili cu stronțitul, care se află încă în traiecul gastro-intestinal, și care apoi se elimină prin fecale. Dacă administrarea decontaminantelor se face la scurt timp după pătrunderea stronțitului în organism, eficacitatea de reducere a contaminării ajunge la 70 ÷ 90%.

Eliminarea ^{137}Cs se face, mai ales, prin urină și fecale (în raportul 2 : 10), după individ: aproximativ 10 % dintr-o doză unică ingerată este eliminată cu $T_b = 1 \div 2$ zile, iar restul cu $T_b = 50 \div 150$ zile. Variațiile apar datorită diferențelor de metabolism de la un individ la altul și a diferențelor de dietă. Perioada biologică T_b (la copii sub 10 ani) este mai mică decât 1 / 3 din T_b (adult). Se admite că pentru omul standard adult $T_b = 100$ zile.

Iodul ^{131}I este radionuclidul care, în cazul căderilor radioactive, produce cele mai mari expuneri la radiații, în timpul cel mai scurt (câteva săptămâni) după explozia sau accidentul nuclear. Datorită perioadei fizice scurte ($T_f = 8$ zile), apar anumite consecințe:

- iodul injectat în stratosferă dispare aproape complet prin dezintegrare, înainte de a reveni pe pământ, astfel încât la contaminarea cu ^{131}I contribuie numai căderile troposferice;

- iodul care a căzut pe sol dispare prin dezintegrare înainte de a fi absorbit de plantele care cresc pe sol, și deci nu ajunge la om;

- cea mai mare parte din ^{131}I căzut pe suprafața plantelor pe care omul le consumă direct se înlătură mecanic (spălare) sau dispare prin dezintegrare în intervalul de timp dintre contaminarea și consumul plantei (hrana omului);

- laptele proaspăt este principalul purtător al ^{131}I din mediu în dieta omului; ^{131}I ingerat apare rapid în lapte, cu un maxim de concentrație la mai puțin de o zi de la ingestie.

În general, comportarea iodului ^{131}I este mult mai dependentă de parametri cum sunt: particularitățile individuale, producția de lapte, sezon, dietă, decât comportarea stronțului ^{90}Sr și a cesiului ^{137}Cs . La om, radionuclidul ^{131}I are ca organ critic tiroida.

Expunerea populației la radiațiile iodului ^{131}I este corelată direct cu produsul a doi factori:

a) fracția din iodul ^{131}I ingerat / gram de tiroidă;

b) consumul de lapte proaspăt.

Transferul radionuclizilor în mediul terestru este prezentat schematic în fig. 16.4.

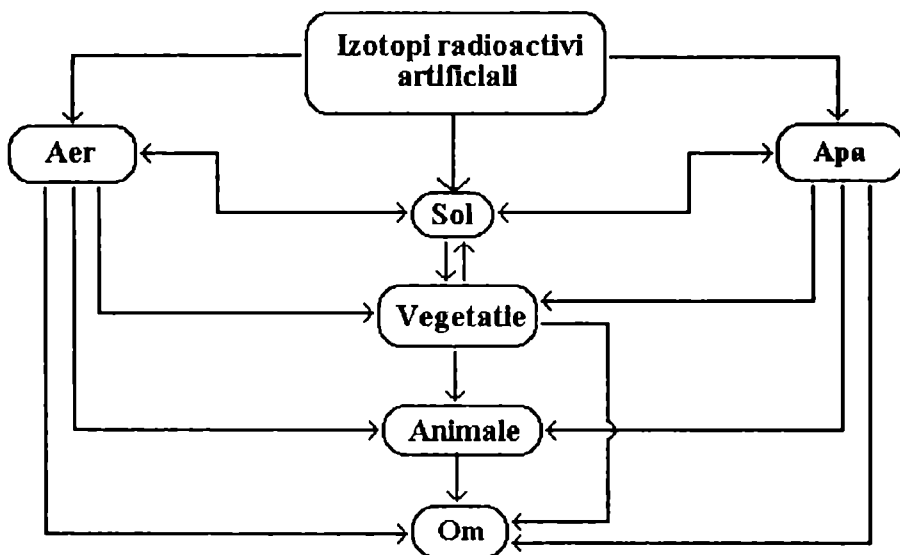


Figura 16.4: Schema transferului radionuclizilor în mediul terestru

Orice alt radionuclid artificial care, pe o cale sau alta, pătrunde în corpul uman va fi metabolizat în mod specific, iar expunerea datorată lui va fi funcție de tipul și de cantitatea de radionuclid, de rolul biologic și organul critic, de starea organismului, etc.

Important de subliniat este faptul că în întreaga lume există multe și variate surse de radionuclizi artificiali și, atâta vreme cât există aceste surse, există și un risc potențial de contaminare radioactivă, fie ea locală, foarte restrânsă, mai extinsă, sau chiar generală.

De aceea, este necesar, pe de o parte, ca aceste surse să fie ținute sub un control riguros, iar pe de altă parte să existe o supraveghere permanentă a nivelului de radioactivitate a diferitelor componente ale mediului, în toate țările de pe glob.

16.5. RADIOTOXICITATEA IRA ȘI METABOLIZAREA LOR ÎN ORGANISMUL UMAN

Radionuclizii artificiali eliberați în mediu, prin diferite fenomene de transport în atmosferă, în mediile acvatice sau în sol, pot ajunge în organisme vii și, în final, prin diferite lanțuri de transfer, în organismul uman. În organismul uman, prin metabolizarea lor, vor tranzita pe diverse căi (respiratorie, gastro-intestinală, urinară, etc.) sau se vor fixa în organele critice specifice anumitor radionuclizi.

Atât în timpul tranzitului, cât și prin fixarea în organe critice, organismul este supus iradierii acestor surse interne de radiații nucleare α , β , γ . Radiotoxicitatea unui radionuclid ajuns în organismul uman este condiționată de: forma chimică (compus solubil sau insolubil), tipul și energia radiațiilor emise și timpii de înjumătățire fizic (T_p), biologic (T_b) și efectiv (T_{ef}). Ținând cont de acești parametri, izotopii radioactivi artificiali au fost clasificați în patru grupe de radiotoxicitate:

○ Grupa I: - cuprinde izotopi radioactivi cu radiotoxicitate foarte mare: ^{241}Am , ^{243}Am , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu .

○ Grupa a II-a: - cuprinde izotopi radioactivi cu radiotoxicitate mare: ^{110m}Ag , ^{141}Ba , ^{45}Ca , ^{115m}Cd , ^{144}Ce , ^{56}Co , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{124}I , ^{126}I , ^{131}I , ^{133}I , ^{114m}In , ^{192}Ir , ^{54}Mn , ^{125}Sb , ^{127}Sb , ^{40}Sc , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{182}Ta , ^{160}Tb , ^{127m}Te , ^{129m}Te , ^{90}Y , ^{95}Zr .

○ Grupa a III-a: - cuprinde izotopi radioactivi cu radiotoxicitate medie: ^{41}Ar , ^{107}Ag , ^{111}Ag , ^{73}As , ^{76}As , ^{77}As , ^{196}Au , ^{198}Au , ^{199}Au , ^{131}Ba , ^{82}Br , ^{14}C , ^{47}Ca , ^{109}Cd , ^{115}Cd , ^{141}Ce , ^{143}Ce , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{51}Cr , ^{131}Cs , ^{136}Cs , ^{64}Cu , ^{165}Dy , ^{166}Dy , ^{18}F , ^{52}Fe , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{130}I , ^{132}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{115m}In , ^{190}Ir , ^{194}Ir , ^{42}K , ^{43}K , ^{85m}Kr , ^{87}Kr , ^{140}La , ^{177}Lu , ^{52}Mn , ^{56}Mn , ^{99}Mo , ^{24}Na , ^{93m}Nb , ^{95}Nb , ^{147}Nd , ^{149}Nd , ^{63}Ni , ^{65}Ni , ^{239}Np , ^{185}Os , ^{191}Os , ^{193}Os , ^{32}P , ^{103}Pd , ^{109}Pd , ^{147}Pm , ^{149}Pm , ^{143}Pr , ^{191}Pt , ^{193}Pt , ^{197}Pt , ^{86}Rb , ^{183}Re , ^{186}Re , ^{105}Rh , ^{97}Ru , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{32}S , ^{85}Sr , ^{91}Sr , ^{96}Te , ^{97m}Te , ^{97}Te , ^{99}Te , ^{125m}Te , ^{127}Te , ^{129}Te , ^{131m}Te , ^{133}Te , ^{171}Tm , ^{48}V , ^{185}W , ^{187}W , ^{135}Xe , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{175}Yb , ^{65}Zn , ^{69m}Zn , ^{97}Zr .

○ Grupa a IV-a: - cuprinde izotopi radioactivi cu radiotoxicitate mică: ^{37}Ar , ^{58}Co , ^{134m}Cs , ^{135}Cs , ^{71}Ge , ^{129}I , ^{113m}In , ^{85}Kr , ^{97}Nb , ^{59}Ni , ^{15}O , ^{191m}Os , ^{193m}Pt , ^{197m}Pt , ^{87}Rb , ^{187}Re , ^{103m}Rh , ^{147}Sm , ^{89m}Sr , ^{90m}Tc , ^{99m}Tc , ^{131m}Xe , ^{133}Xe , ^{69}Zn , ^{63}Zr .

Dintre toți acești izotopi radioactivi artificiali, importanță potențial mare (radiobiologică) au următorii: ^{131}I , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{14}C și ^3H , fie datorită rolului biologic al elementului chimic corespunzător (^{131}I , ^3H , ^{14}C), fie datorită mimetismului chimic cu elementele chimice care au rol biologic (^{137}Cs , ^{134}Cs cu potasiul, ^{90}Sr cu calciul), și a randamentului mare cu care sunt generate, fie datorită radiotoxicității foarte mari (^{239}Pu) și a timpilor de înjumătățire foarte mari.

În perioada efectuării unor intense experimente nucleare în atmosferă (1950 - 1965) au înregistrat niveluri de radioactivitate mari și foarte mari, generate de nucleizii menționați

în atmosferă, în hrana vegetală sau cea de origine animală (în special în lapte și în carne), și în organismul uman (^{137}Cs , ^{131}I , ^{90}Sr). Situații similare s-au înregistrat după accidente nucleare majore, ca cel de la Cernobîl, când radionuclizii ^{137}Cs , ^{134}Cs și ^{131}I au contaminat pe arii extinse aerul, solul, vegetația, fauna și populația mai multor țări.

O parte din radionuclizii artificiali aparțin unor elemente chimice cu rol biologic deosebit de important pentru organismul uman, cum sunt:

■ ^3H și ^{14}C - elemente de structură ale întregului organism;

■ ^{65}Zn - elementul zinc este constituentul enzimelor și a altor metaloproteine, acumularea lui în organism fiind legată de procesele metabolice; are factori de concentrare mari în pești (5.000), moluște (80.000), crustacei (4.000) și alge;

■ ^{51}Cr - elementul crom are rol de activator al enzimelor; factorul de concentrare în pești este 500;

■ ^{55}Fe și ^{59}Fe - fierul are funcții catalitice, este activator al enzimelor și este conținut în metaloproteine; are factori de concentrare mari la organisme marine: pești (1.000), moluște (20.000), crustacei (5.000), alge (20.000), etc.;

■ ^{60}Co - cobaltul, ca și fierul, are funcții catalitice, este activator a numeroase enzime, este constituent al metaloproteinelor și este conținut în vitamina B₁₂;

■ ^{129}I și ^{131}I - iodul intră în compoziția aminoacizilor din speciile de animale marine și în glanda tiroidă la om;

■ ^{52}Mn și ^{56}Mn - manganul este conținut în metaloproteine, fiind activator al enzimelor; are factori de concentrare mari la pești (1.000), moluște (10.000) și crustacei (5.000);

■ ^{99}Mo - molibdenul este constituentul majorității enzimelor.

Mulți dintre radionuclizii artificiali aparțin unor elemente care nu au nici un rol biologic sau care, dacă există, nu este încă aflat și nici nu prezintă mimetism chimic cu elementele care au rol biologic. Totuși, acești radionuclizi pot ajunge în organismul uman și pot produce contaminarea internă a acestuia.

Radionuclizii artificiali pot pătrunde în organismul uman pe cale respiratorie (prin inhalarea de aerosoli radioactivi din aerul contaminat), pe cale digestivă (apă și hrană contaminată, sputa contaminată provenită din căile respiratorii și înghițită) și cutanat.

Ca și în cazul izotopilor radioactivi naturali, radionuclizii pătrunși în căile respiratorii se pot depune în una din zonele: nazofaringiană, traheo-pulmonară sau pulmonară. În continuare, pot fi eliminați prin respirație, expectorație, odată cu sputa sau antrenați spre tractul gastro-intestinal odată cu sputa înghițită. La nivelul arborelui bronșic și a tractului gastro-intestinal se produce absorbția în sânge a radionuclizilor și transportul lor spre diferite țesuturi (organe).

Trecerea de la o etapă la alta, de la un organ la altul sau de la un organ spre un lichid al corpului și invers se face cu factori de transfer (FT) specifici, care depind de radionuclid, de compartimentele între care are loc transferul, etc. Aceștia vor determina, în ultimă instanță, factorul de concentrare (FC) al corpului uman în întregul său, ori al unui organ pentru un radionuclid dat.

La ingestia unui radionuclid, o parte din cantitatea ingerată este absorbită în sânge la nivelul intestinal, iar cealaltă parte este eliminată prin fecale. Frațiunea absorbită în sânge este transportată spre diverse organe din corp și variază de la un radionuclid la altul. Astfel, radionuclizii ^{137}Cs și ^{131}I sunt practic reținuți integral în organism, în timp ce ^{90}Sr numai în proporție de 30 %, restul fiind eliminat.

După modul cum sunt metabolizați, radionuclizii artificiali, ca și cei naturali, sunt clasificați în categoriile:

- radionuclizi transferabili (solubili în mediul biologic): ^3H , ^{14}C , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{129}I , ^{131}I , etc.;

- radionuclizi netransferabili (aflați sub formă de compuși insolubili la orice pH), care nu difuzează în organism și au ca organ critic poarta de intrare, sau care difuzează foarte puțin și au ca organ critic ficatul (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am , Cm , Cf).

Radionuclizii artificiali sunt eliminați în mod natural din organismul uman pe căile: renală (urină), digestivă (fecale și salivă), pulmonară (mucoase nazale, aer expirat), tegumentară (transpirație). Perioada de înjumătățire biologică T_b depinde de factori biologici, pe de o parte (vârstă, sex, organ, etc.) și de proprietățile chimice ale radionuclidului, pe de altă parte.

În tabelul 16.2 sunt sintetizate proprietățile unora dintre acești izotopi radioactivi artificiali rezultați în special prin activare cu neutroni sau prin fisiune nucleară în exploziile nucleare și în centralele nucleare electrice, cu impact deosebit asupra organismului uman, căile de transfer spre om și timpul de „staționare” în organismul uman.

Tabelul 16.2: Proprietățile unor izotopi radioactivi artificiali (IRA), căile de transfer la om și timpul de staționare în organismul uman (ref. [11,12])

IRA (rad. emise)	$T_{1/2}$ (fizic)	Surse artificiale	Căi de transfer	Organ de referință	$T_{1/2}$ (efectiv)
^3H (β)	12,3 ani	$^1_0\text{n} + ^2_1\text{H}$	aer, apă, hrană, cutanat	tot corpul	12 zile
^{14}C (β)	5730 ani	explozii nucleare	aer, apă, hrană	tot corpul tesut adipos	10 zile 12 zile
^{54}Mn (γ)	310 zile	$^1_0\text{n} + ^{54}\text{Mn}$	apă, lanțuri trofice marine	ficat, plămân, tract g.i.	2,3 ani
^{59}Fe (X)	2,7 ani	$^1_0\text{n} + ^{54}\text{Fe}$ în explozii nucleare și reactori	plante marine pești om	plămân tot corpul	2,2 ani 1,3 ani
^{60}Co (β , γ)	5,2 ani	$^1_0\text{n} + ^{59}\text{Co}$	vegetație, lanțuri trofice marine	tot corpul plămân	9,5 zile
^{65}Zn (γ)	243,7 zile	$^1_0\text{n} + ^{64}\text{Zn}$ în explozii nucleare și reactori	plante marine → pești → om	tot corpul ficat	184 zile 66 zile
^{90}Sr (β) ^{90}Si (β)	50,5 zile 27,7 ani	fisiune: explozii nucleare și reactori	plante → animale → lapte → om	os os	50,4 zile 17,5 ani

$^{95}\text{Zr} (\beta, \gamma)$	65 zile	fisiune: explozii nucleare și reactori	plante	tot corpul plămân, tract g.i.	55,5 zile
$^{99\text{m}}\text{Tc} (\gamma)$	90 zile	produs de activare cu neutroni în reactor	lanțuri trofice marine radioterapie	diverse organe, tiroidă	
$^{99\text{m}}\text{Tc} (\gamma)$	6 ore	produs de activare cu neutroni în reactor	lanțuri trofice marine, aer, apă, hrană		
$^{99}\text{Tc} (\beta)$	$2,1 \cdot 10^5$ ani	-produs de fisiune în explozii și reactori nucleari -deșeuri reprocesare combustibili nucleari			
$^{129}\text{I} (\beta, \gamma)$	$1,6 \cdot 10^7$ ani	-produs de fisiune în explozii nucleare și reactori	plante → animale → lapte → om	tiroidă	138 zile
$^{131}\text{I} (\beta, \gamma)$	8,04 zile	deșeuri reprocesare combustibili nucleari	inhalare, cutanat		7,6 zile
$^{134}\text{Cs} (\beta, \gamma)$	2,05 ani	fisiune în explozii nucleare și reactori	plante → animale → lapte	muschi	138 zile
$^{137}\text{Cs} (\beta, \gamma)$	30,17 ani		→ om	ficat	70 ÷ 97 zile
$^{136}\text{Cs} (\beta, \gamma)$	13 zile		plante → carne → om	tot corpul	12 zile
$^{140}\text{Ba} (\beta, \gamma)$	12,8 zile	produs de fisiune în explozii nucleare și reactori	plante	plămân os	12,8 zile 10,7 zile
$^{141}\text{Ce} (\beta, \gamma)$	32,5 zile	fisiune în explozii și în reactori nucleari	plante	os, ficat	30; 29 zile
$^{144}\text{Ce} (\beta, \gamma)$	285 zile				30; 246 zile
$^{237}\text{Np} (\alpha, \gamma)$	$2,14 \cdot 10^6$ ani	dezintegrarea ^{241}Am	inhalare, ingestie, hrană	os, plămân, tract g.i.	200 ani
^{238}Pu	86,4 a	combustibili pentru sateliți și	inhalare	os, ficat	63; 64 ani
^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$ a	-explozii nucleare	ingestie, hrană		197; 82 ani
^{240}Pu	$6,58 \cdot 10^3$ a	-teste nucleare			195; 82 ani
^{241}Pu	13,2 ani	-deșeu reactori nucleari			12; 11 ani
^{241}Am	451 ani	activarea cu neutroni a ^{239}Pu în explozii nucleare și în reactori	inhalare ingestie	os rinichi	139 ani 63 ani

Obs.: Tract g.i. = tract gastrointestinal

CAPITOLUL 17

SUPRAVEGHEREA RADIOACTIVITĂȚII MEDIULUI AMBIANT

17.1. INTRODUCERE

În conjunctura internațională actuală, factorii ecologici reprezintă un element major care impune un anumit nivel al dezvoltării tehnologice, prin cerințele stricte referitoare la emisiile nocive în timpul proceselor tehnologice. Dezvoltarea unei țări implică efecte colaterale care nu pot fi oprite la granița acesteia. De aceea, a fost necesar ca pe plan internațional să fie stabilite anumite norme stricte care limitează impactul de mediu produs de anumite activități naționale.

Respectarea normelor internaționale este obligatorie, comunitatea internațională sancționând drastic încălcarea voluntară a acestora.

În acest sens, respectarea standardelor ecologice este în prezent un element cheie în realizarea programelor de dezvoltare națională și, implicit, a programelor energetice.

Sursa nucleară de energie este o opțiune pentru viitor pentru întreaga planetă. Dar, dezvoltarea energiei nucleare trebuie să se facă în cele mai stricte condiții de respectare a normelor internaționale de protecția mediului.

O componentă importantă a activităților nucleare o constituie supravegherea permanentă a radioactivității mediului, atât pe plan național, cât și pe plan internațional, care permite semnalarea cu promptitudine a oricărui eveniment nuclear anormal și determină luarea măsurilor necesare pentru stoparea și limitarea efectelor lui.

17.2. SISTEME INTERNAȚIONALE DE MONITORIZARE A MEDIULUI

Supravegherea radioactivității mediului face parte din ansamblul de măsuri luate la nivel planetar, național și local (regional) cu scopul protecției mediului înconjurător și a omului.

Pentru coerența rezultatelor măsurărilor de mediu făcute în diferite laboratoare destinate acestui scop, era necesară introducerea unor standarde și a unor procedee comune care să asigure, totodată, și progresul în problemele de mediu.

În acest sens, în cadrul UNEP (United Nations Environment Program - Programul pentru Mediu al Națiunilor Unite) a fost elaborat un Program de Supraveghere a Mediului pe Terra care, având ca scop principal protecția mediului pe planeta noastră, își propune eliminarea neconcordanțelor și uniformizarea rezultatelor obținute în laboratoarele din diverse țări. Programul are trei componente:

- un sistem de monitorizare globală a mediului GEMS (Global Environment Monitoring System) și de monitorizare integrală globală a fondului IGBM (Integral Global Background Monitoring) recunoscut și aplicat în circa 140 de țări, din anul 1990;

- un sistem de informație INFOTERA cu rețele de informații în 140 de țări și care răspunde la circa 20.000 de cereri de informații pe an.

- Registrul Internațional privind Substanțele Chimice Potențial Toxice IRPTC (International Register of Potential Toxic Chemicals).

Sistemul global de monitorizare este organizat pe cinci mari domenii: climă, poluare transfrontieră, refacerea surselor naturale terestre, oceane și poluarea mediului.

În zona poluată ce urmează a fi studiată, se instituie un sistem de monitorizare așa-zis de impact (de tip GEMS) care să furnizeze date științifice despre starea mediului.

Monitorizarea fondului se realizează înainte de intervenția poluării mediului și rezultatele înregistrate servesc drept referință în stabilirea tipului și gradului de poluare.

Factorii de mediu ce se au în vedere sunt aerul, apa și solul. Componenta biologică (Biota) este inclusă, în mod obișnuit, în cei trei, și numai câteodată este analizată separat.

Monitorizarea devine globală și integrală atunci când măsurarea diferitelor variabile sau a acelorași variabile în diferite locuri sunt coordonate în spațiu și timp, în scopul realizării unei evaluări comprehensive a sistemului studiat.

Între obiectivele activității de monitorizare a fondului global integrat al mediului, se numără:

- observarea și înregistrarea stării curente a mediului și a factorilor care îl pot afecta;
- programarea și evaluarea evoluției în timp a stării mediului, având ca date inițiale măsurători cât mai recente;
- stabilirea direcțiilor principale ale poluanților naturali și artificiali și a tendințelor curente și viitoare în zonele afectate.

Stațiile de monitorizare a fondului trebuie să furnizeze informații concrete despre:

- principalii poluanți artificiali ce urmează a fi monitorizați;
- zonele expuse impactului cu poluanți;
- frecvența observațiilor;
- observațiile concomitente sau suplimentare.

După înființarea celor două sisteme de monitorizare cu caracter internațional, la noi în țară au apărut subsisteme naționale de monitorizare de fond și de impact pentru apă, aer și sol. Ele sunt astfel concepute încât să se încadreze în cele cinci domenii ale sistemului internațional: climă, poluare transfrontieră și locală, oceane (mări) și refacerea resurselor naturale.

O componentă importantă a sistemului internațional de monitorizare a mediului o constituie monitorizarea radioactivității mediului. În România există, la ora actuală, o rețea națională de supraveghere a radioactivității mediului, componentă a sistemului internațional de monitorizare.

17.3. REȚEAUA NAȚIONALĂ DE SUPRAVEGHERE A RADIOACTIVITĂȚII MEDIULUI (RNSRM) DIN ROMÂNIA

RNSRM din România a luat ființă în 1962 și era formată din 20 de laboratoare situate în vecinătatea stațiilor meteorologice. Ea a apărut din necesitatea de a monitoriza radioactivitatea mediului puternic poluat ca urmare a numeroaselor teste nucleare militare efectuate în atmosferă în deceniul al cincilea de către statele dezvoltate (SUA, URSS, etc.).

Se măsoară activitatea β - globală pe următorii factori de mediu: aerosoli, precipitații, depuneri, ape de suprafață și freatice, sol și vegetație spontană.

Evenimentele nucleare importante ce au urmat (punerea în funcțiune, în 1974, a Centralei Nucleare de la Kozlodui - Bulgaria; experimentele nucleare efectuate în atmosferă de către Franța și China, în deceniile 7-8; începerea construcției Centralei Nucleare de la Cernavodă - România, în 1980; accidentul nuclear de la Cernobâl - Ucraina, în 1986) au determinat continuarea activității de monitorizare a radioactivității mediului în România, modernizarea și dezvoltarea RNSRM.

Obiectivele acestei rețele sunt:

- ☐ detectarea rapidă a oricăror creșteri rapide ale nivelului de radioactivitate a mediului și acțiuni de alarmare a autorităților;
- ☐ sprijinirea autorităților în caz de accident nuclear (efectuarea de măsurători și estimări a nivelului de iradiere în zona contaminată sau pe întreg teritoriul țării, în timpul accidentului și post-accident);
- ☐ supravegherea radioactivității mediului în zona centralelor de la Kozlodui și Cernavodă;
- ☐ controlul radioactivității în jurul unor obiective industriale cu potențial de poluare radioactivă (mine de uraniu, termocentrale pe bază de cărbune, combinate chimice de îngrășăminte fosfatice);
- ☐ evaluarea radioactivității diferiților factori de mediu și studiul evoluției spațio-temporale a acestora la nivelul țării.

Structura actuală a rețelei (fig. 17.1) cuprinde 47 de laboratoare de monitorizare a mediului, repartizate pe întreg teritoriul țării, astfel: în fiecare județ câte un laborator; două laboratoare în zonele de influență a centralelor Cernavodă (la Cernavodă) și Kozlodui (la Bechet); două laboratoare de altitudine (la Babele și la Toaca); un laborator în Delta Dunării (la Sf. Gheorghe).

Factorii de mediu urmăriți sunt:

- aerul la o înălțime de 1,7 m de la suprafața solului;
- depuneri atmosferice și precipitații;
- ape de suprafață (râuri, lacuri, Dunăre), ape de adâncime (foraje), apă potabilă;
- vegetație spontană (iarbă) și de cultură (grâu, porumb);
- sol necultivat.

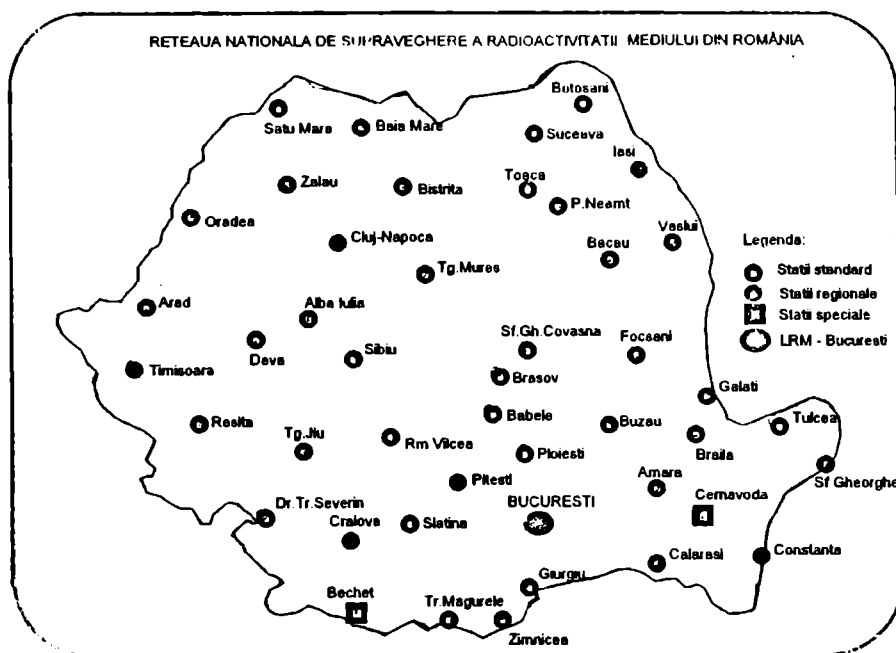


Figura 17.1: Rețeaua Națională de Supraveghere a Radioactivității Mediului (ref.[37])

Laboratoarele de Radioactivitatea Mediului sunt organizate pe mai multe categorii, după destinația lor:

○ Laborator de Radioactivitatea Mediului ICIM (LRM) aparținând de Ministerul Apelor, Pădurilor și Protecției Mediului (MAPPM) care are sarcini speciale de coordonare, îndrumare științifică, pregătirea personalului, asigurarea calității datelor, asigurarea derulării fluxului informațional, elaborarea și implementarea metodologiilor de lucru, etalonarea și verificarea aparaturii de măsurare, elaborarea de proceduri specifice în caz de accident nuclear.

○ Laboratoare speciale - sunt cele din zonele vecine cu centralele nucleare Cernavodă și Bechet, care monitorizează nivelul radioactivității mediului și evaluează impactul funcționării centralelor nucleare electrice asupra mediului, în cadrul unor programe complexe de prelevare, pregătire și măsurare a probelor de mediu.

○ Laboratoare regionale care asigură monitorizarea radioactivității mediului.

În paralel cu rețeaua de laboratoare de radioactivitatea mediului ale MAPPM funcționează Rețeaua de Laboratoare de Igiena Radiațiilor din cadrul Ministerului Sănătății care, printre altele, au și atribuții cu specific nuclear, cum ar fi:

- evaluarea dozelor individuale și colective ale populației din jurul obiectivelor nucleare majore, prin controlul radioactivității produselor alimentare și a apei potabile din zonă;
- controlul asigurării condițiilor de radioprotecție la locul de muncă;
- controlul expunerii și stării de sănătate a personalului expus la iradiere profesională;
- controlul radioactivității bunurilor de larg consum; etc

Pentru coerența rezultatelor obținute de diferitele laboratoare din rețeaua națională și din cea internațională se impune ca datele de bază (măsurătorile făcute pe teren) să se alinieze, ca denumire, prezentare și unități de măsură, standardelor internaționale și naționale. Pe baza acestor date și a prelucrării lor computerizate se stabilesc valori medii zilnice, lunare, anuale și se construiesc hărți zonale-regionale care prezintă situația mediului din punct de vedere al poluării la un moment dat. De asemenea, se construiesc pe calculator bănci de date care stau la baza prognozei computerizate a evoluției în timp a poluării radioactive a mediului și stabilirea măsurilor locale, naționale și internaționale ce se impun a fi luate în caz de accident nuclear, indiferent în ce parte a globului ar avea loc, pentru minimizarea efectelor asupra mediului și pentru protecția populației din zonele afectate.

17.4. MĂSURĂTORI DE MEDIU EFECTUATE ÎN LABORATOARELE DIN RNSRM DIN ROMÂNIA

17.4.1. MĂSURĂTORI β - GLOBALE

Măsurătorile β - globale sunt cele mai rapide și cele mai utilizate în sistemul de supraveghere a factorilor de mediu. Unul dintre avantajele acestui tip de măsurători îl constituie aparatura simplă, sensibilă și robustă pe care o necesită.

Lațul de măsurare β - global se compune dintr-un detector de radiații β și un sistem de numărare în variantele:

- a) Contor Geiger-Muller în montaj de anticoincidență, de tip Philips, și ansamblu de numărare modular NIM, de tip Nuclear & Vacuum,

sau

- b) Sondă ND 304 cu scintilator plastic în sistem de numărare Nuclear Enterprises.

Etalonarea aparaturii se face, pentru toate tipurile de probe, cu etaloane de ^{90}Sr - ^{90}Y , cu valori cuprinse între $5 \div 50$ Bq. Fondul instalației de măsură trebuie să fie între 3,5 și 6,5 pulsuri pe minut, iar factorul de etalonare ($p = \frac{R}{\Lambda}$) este între $13,5 \div 23$ pulsuri /minut · Bq.

Probele colectate și pregătite conform unei metodologii standard sunt puse pe tăvițe speciale, în fața detectorului pentru determinarea activității.

Programul de lucru la stațiile RNSRM implică:

- măsurări imediate ale probelor de mediu și metode rapide de evaluare a activității, care au ca scop detectarea imediată a oricărei creșteri semnificative a radioactivității;

- măsurarea probei după cinci zile de la colectare, pentru a determina nivelul global al radioactivității artificiale în mediu;

- măsurarea radioactivității β naturale (generată de descendenții R_n și T_n emanați de sol) în probele de aerosoli, cu scopul interpretării corecte a rezultatelor măsurătorilor imediate și a urmăririi variației radioactivității naturale în atmosferă.

Rezultatele măsurătorilor β - globale se compară cu valorile care reprezintă nivelul de atenționare pentru fiecare tip de probă, stabilit de CRIAN (Comisia Republicană de Intervenție în caz de Accident Nuclear) și sunt date în tabelul 17.1.

Rezultatele obținute de diferitele stații ale RNSRM privind radioactivitatea factorilor de mediu sunt centralizate, prelucrate și analizate de Laboratoarele de Radioactivitatea Mediului (LRM) din Institutul de Cercetare și Ingineria Mediului (ICIM) de la stația Afumați.

Tabelul 17.1 Nivelul de atenționare pentru fiecare tip de probă, stabilit de CRIAN pentru măsurătorile β-globale

Proba de mediu	Nivel de atenționare
Aerosoli	50 mBq / m ³
Depuneri și precipitații atmosferice	200 Bq/m ² zi pentru măsurare imediată 50 Bq / m ² zi pentru măsurare la 5 zile
Apa potabilă și apa brută	Nu există STAS-uri pentru radioactivitate; se compară cu valoarea medie anuală
Sol	Nu există STAS-uri pentru radioactivitate; se compară cu valoarea medie anuală
Vegetatie	Nu există STAS-uri pentru radioactivitate; se compară cu valoarea medie anuală

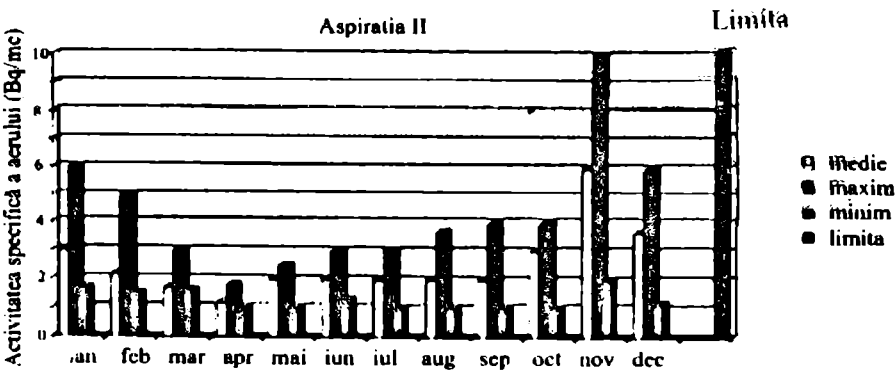
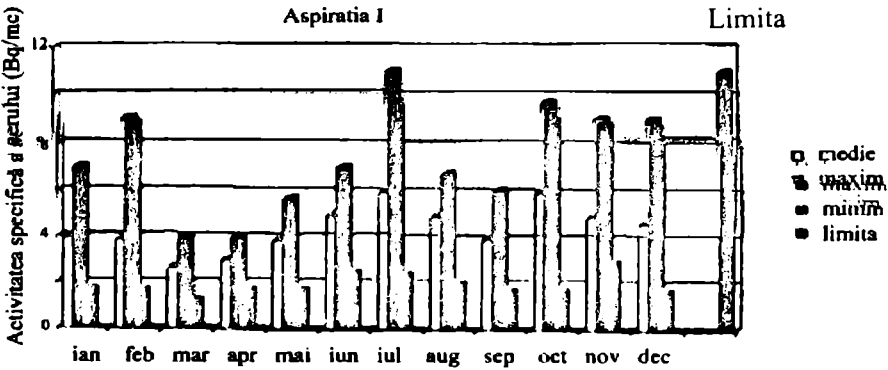


Figura 17.2:
Activitatea β specifică echivalentă a probelor de aer colectate în 1996 în aspirațiile I și II (Raport anual LRM-ICIM)

În fig. 17.2 și 17.3 sunt reproduse rezultatele din raportul anual al LRM din ICIM, privind radioactivitatea β - globală (media anuală și maxima anuală), obținute în diferite stații din RNSRM în anul 1972, pentru probe de aer.

Pe verticală sunt date activitățile β specifice echivalente definite ca raportul viteza de numărare

$$\Lambda_{s, \text{equiv.}} = \frac{\text{debit} * \text{timp} * \text{factor de detecție}}{\text{pompa de aspirare}}$$

care este aproximativ egală cu activitatea β a descendenților radonului (dominantă pe filtru) și în care nu se ține cont de dezintegrarea izotopilor radioactivi, în timpul filtrării și măsurării.

În fig. 17.4 sunt date rezultatele măsurătorilor β - globale efectuate pe teritoriul județului Argeș, pentru diferiți factori de mediu, în anul 1996.

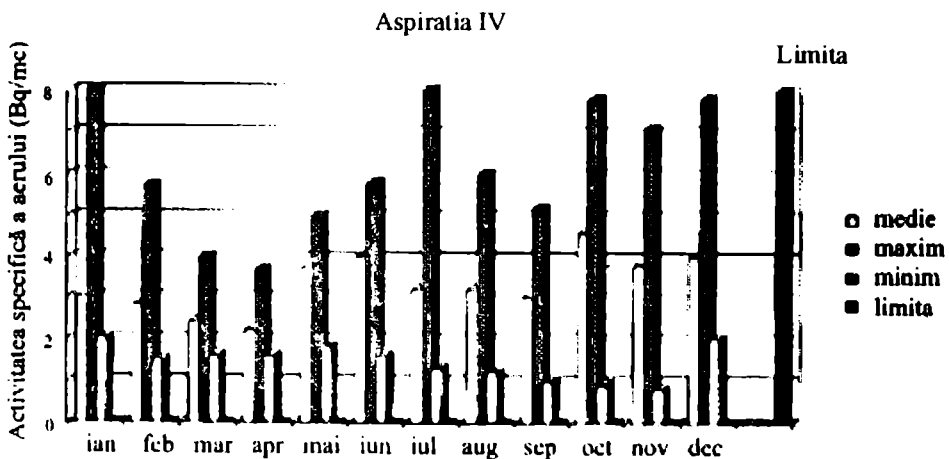
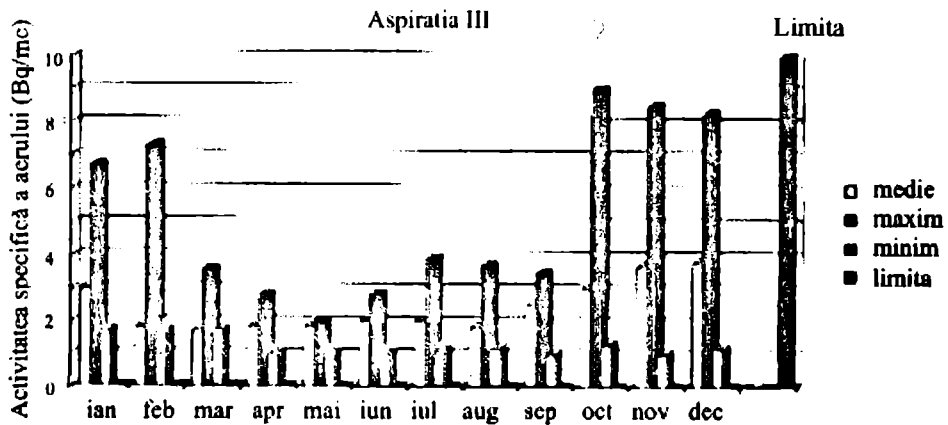


Figura 17.3: Activitatea β specifică echivalentă a probelor de aer colectate în 1996 în aspirațiile III și IV. (LRM-ICIM).

Tabelul 17.2: Tipul și frecvența de colectare a probelor

Tipul probei	Frecvența de colectare
Aerosoli (Aspirațiile I, II, III, IV)	4 aspirații pe zi, cu durată de 5 ore pentru fiecare aspirație, între orele: 2 ⁰⁰ -7 ⁰⁰ ; 8 ⁰⁰ -13 ⁰⁰ ; 14 ⁰⁰ -19 ⁰⁰ ; 20 ⁰⁰ -1 ⁰⁰
Depuneri și precipitații atmosferice	o probă pe zi
Apă potabilă	o probă pe zi
Apă de suprafață	o probă pe zi
Vegetație	o probă pe săptămână
Sol	o probă pe săptămână

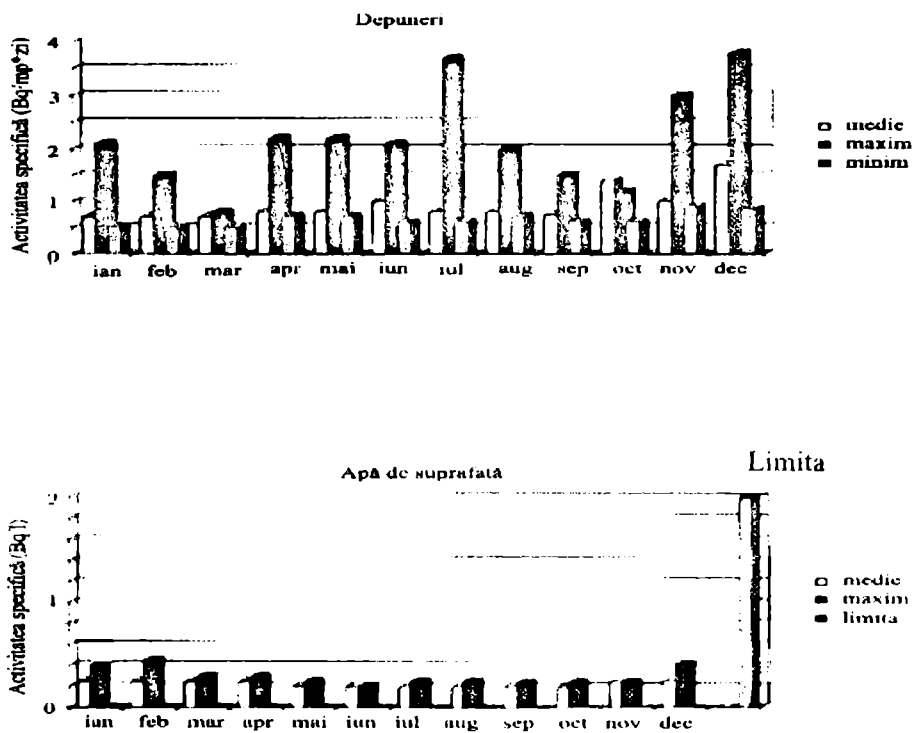


Figura 17.4: Activitatea specifică a probelor de depuneri și de apă de suprafață colectate în 1996 . (Județul Argeș).

În tabelul 17.2 sunt date frecvențele de colectare a probelor. În grafice sunt reprezentate valorile maximă și minimă și media pentru toate lunile anului 1996; în extrema dreaptă a unora dintre grafice este reprezentată, pentru comparație, limita de avertizare. Se observă că toate valorile medii din județul Argeș pentru anul 1996 se află sub limitele de avertizare corespunzătoare.

17.4.2. MĂSURĂTORI γ - SPECTROMETRICE

Determinarea concentrației diferiților radionuclizi în probele de mediu se face prin spectroscopie γ de mare rezoluție.

Probele se recoltează în fiecare stație a RNSRM după un program unic, caracteristic fiecărui tip de probă. Aparatura necesară constă din lanțuri γ spectrometrice, dotate cu detectori de Ge(Li) și HPGe (germaniu hiperpur) de rezoluție foarte bună ($1,8 \div 2,2$ keV la 1332 keV) și eficacitatea între $6,5 \div 40$ %. Reducerea fondului γ se face prin ecranarea detectorilor cu Pb cu grosimea pereților de 10 cm, căptușite în interior cu tablă de aluminiu și cupru de $0,5 \div 1$ mm. Impulsurile sunt preluate de electronica asociată (preamplificator, amplificator, mixer) și transmise la analizoare multicanal. Analiza spectrelor obținute se face prin prelucrarea automată pe calculator cu programe speciale.

Lanțurile sunt calibrate energetic cu un set de surse γ etalon, furnizate de IFIN - Măgurele (București). Etalonarea în eficacitate se face cu surse etalon volumice. Verificarea etalonărilor se face prin intercomparări organizate pe plan intern de IFIN București, iar pe plan internațional de AIEA (Agenția Internațională pentru Energie Atomică) de la Viena.

Pentru ilustrare, în fig. 17.5 este dat spectrul γ măsurat în IFIN pentru o probă de sedimente colectată la Sulina-Mila 25 în anul 1995.

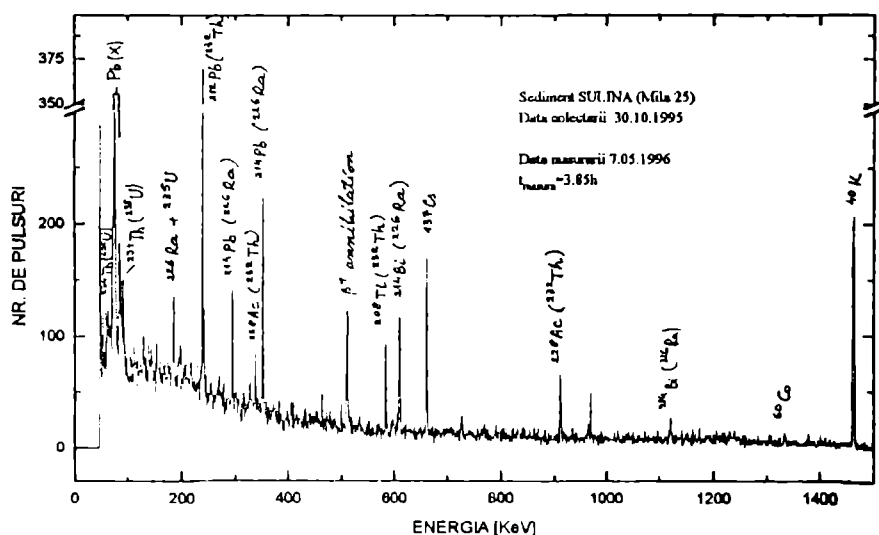


Figura 17.5: Spectrul γ măsurat în IFIN pentru o probă de sedimente colectată la Sulina-Mila 25 în anul 1995

În fig. 17.6 este dat spectrul γ obținut la măsurarea fondului γ al laboratorului, care este folosit ca referință pentru estimarea radioactivității probelor generate de diferiți izotopi radioactivi naturali și artificiali. Pe grafice sunt însemnate data colectării probei, data la care s-a făcut măsurătoarea și timpul cât a durat fiecare măsurătoare. Se observă prezența următorilor izotopi radioactivi, identificați după energiile razelor γ și cu activitățile specifice pe care le generează date în paranteză:

- ^{214}Pb (81,6 Bq /kg);
- ^{208}Tl (46,9 Bq /kg);
- ^{214}Bi (45,2 Bq /kg);
- ^{137}Cs (15,1 Bq /kg);
- ^{228}Ac (32,9 Bq /kg);
- ^{40}K (155 Bq /kg).

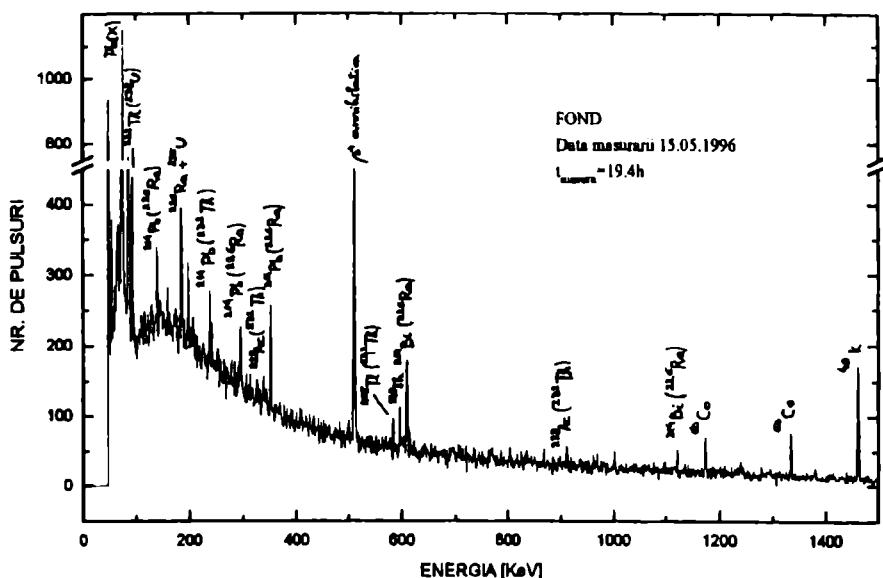


Figura 17.6: Spectrul γ al fondului laboratorului din IFIN

Din datele rapoartelor locale și naționale rezultă că în cazurile date, radioactivitatea mediului în România, în anul 1992 și în județul Argeș (1996), s-a încadrat în normele ecologice prevăzute de standardele internaționale și naționale.

Asemenea rapoarte se întocmesc anual în fiecare stație de supraveghere din RNSRM și sunt transmise la LRM din cadrul ICIM, care pe baza lor analizează situația la nivelul întregii țări. Datele sunt incluse apoi în băncile de date națională și internațională pentru radioactivitatea mediului.

17.5. MĂSURAREA RADIOACTIVITĂȚII CORPULUI UMAN

Contaminarea internă a organismului uman cu IR poate fi accidentală (inhalare sau ingerare unică a unei substanțe radioactive) sau cronică (subiectul uman este expus sistematic la contaminări interne, de regulă iradierei profesionale).

Detectarea contaminării interne cu radionuclizi β - emițători se poate realiza prin măsurători de radioactivitate β - globală asupra unor probe biologice (urină, fecale, sânge, etc.) colectate de la subiecții suspecți a fi contaminați, probe preparate corespunzător. Nivelul de radioactivitate al probelor se compară cu valorile medii obținute pe același tip de probe colectate de la diferiți subiecți în absența contaminării.

În cazul radionuclizilor γ - emițători, determinarea contaminării interne constă dintr-o analiză calitativă prin care se identifică radionuclizii contaminanți și o analiză cantitativă care permite determinarea activităților pentru fiecare izotop în parte.

Măsurătorile de spectrometrie γ necesare analizelor calitative și cantitative pot fi efectuate direct, asupra întregului corp cu ajutorul unui contor de corp uman, sau indirect pe probe biologice cu lanțuri spectrometrice γ obișnuite. Cea mai utilizată metodă de evaluare a radionuclizilor γ emițători încorporați în organismul uman este metoda directă, efectuată cu

contoarele de corp uman cu achiziția și prelucrarea computerizată a datelor. Această metodă permite ca într-un timp relativ scurt, de ordinul minutelor, să se evalueze direct activitatea IR contaminanți în momentul măsurătorii. Cu aceste date se pot estima activitățile încorporate la momentul inițial și dozele aferente încasate de către subiecți.

Contorul de corp uman este un spectrometru γ cu sonda de scintilație care permite detectarea și măsurarea activităților slabe încorporate în organism (se folosesc scintilatori de dimensiuni mari pentru a avea eficacitate mare de detecție). În fig.17.7 este dată schema de principiu a contorului uman construit în IFIN- București (ref. [39]).

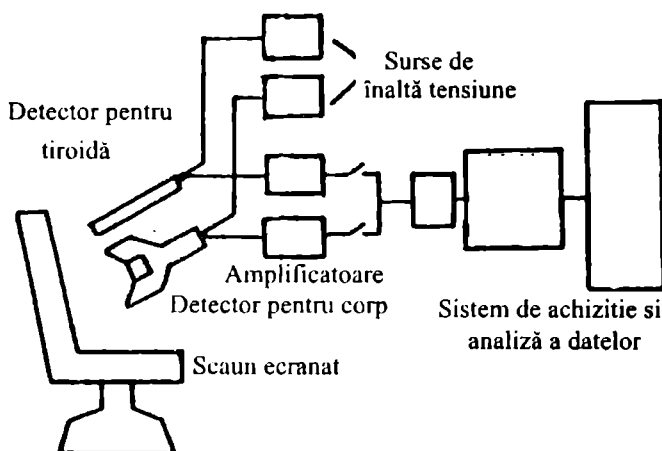


Figura 17.7: Schema contorului uman (din ref.[39])

El constă din:

- ☐ scaunul subiectului (fabricat din plumb);
- ☐ două sonde de scintilație ecranate cu mantale de plumb, dintre care una este pentru torace și abdomen iar cealaltă pentru tiroidă, ambele fixate pe suportul scaunului;
- ☐ două lanțuri spectrometrice;
- ☐ interfața PC;
- ☐ computer pentru achiziția și prelucrarea datelor.

Cu ajutorul acestui contor de corp uman s-a urmărit contaminarea corpurilor omenești cu ^{137}Cs și ^{134}Cs în urma accidentului de la Cernobâl din 1986 (ref.[39]). Contaminarea internă s-a datorat contaminării fructelor, legumelor, cerealelor de la norul radioactiv și indirect a lactatelor, a cărnii, a pâinii, etc.

Au fost măsurate 2883 de persoane din București, periodic, în intervalul iulie 1986 - decembrie 1989. În fig. 17.8 este dat spectrul γ pentru un subiect.

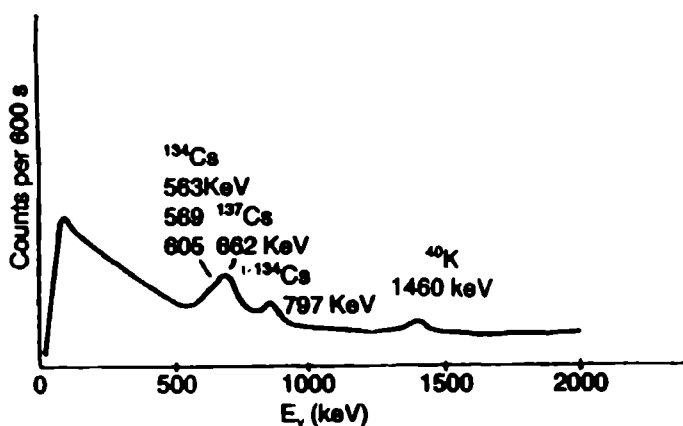


Figura 17.8: Forma spectrului γ pentru un subiect

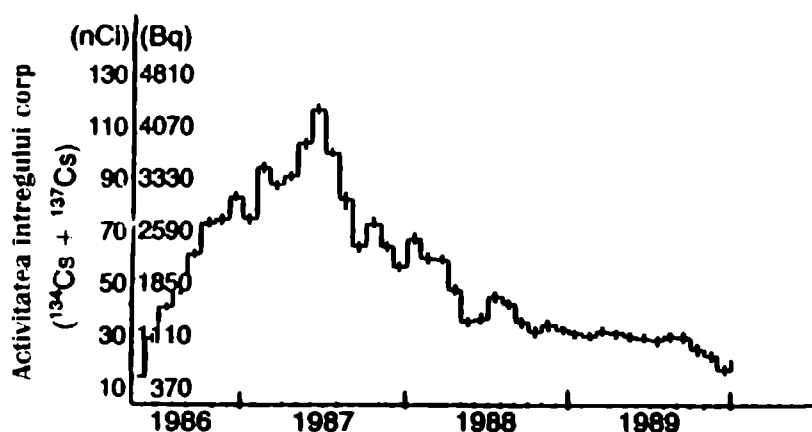


Figura 17.9: Variația în timp a contaminării interne medii cu $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$, în perioada post-Cernobâl a unui număr de 2883 subiecți din București (ref. [39])

până în octombrie 1986, când atinge valoarea 2682 Bq. Urmează o creștere mai lentă, cu maximum de circa 4300 Bq în iunie 1987, după care începe să scadă treptat, până în 1989, când atinge valoarea măsurată înainte de accidentul de la Cernobâl.

În fig. 17.10 este redată cumulara echivalentului de doză efectiv (EDE) în corpul uman (media pe cei 2883 subiecți) în perioada considerată.

Aceste măsurători arată, pe de o parte, comoditatea utilizării contorului uman la determinarea contaminării interne, cu radionuclizi γ - emițători și urmărirea evoluției în timp a acestei contaminări, iar pe de altă parte, arată cât de puternic influențează contaminarea mediului înconjurător cu IRA asupra contaminării interne a organismului uman cu toate consecințele care decurg de aici asupra sănătății populației.

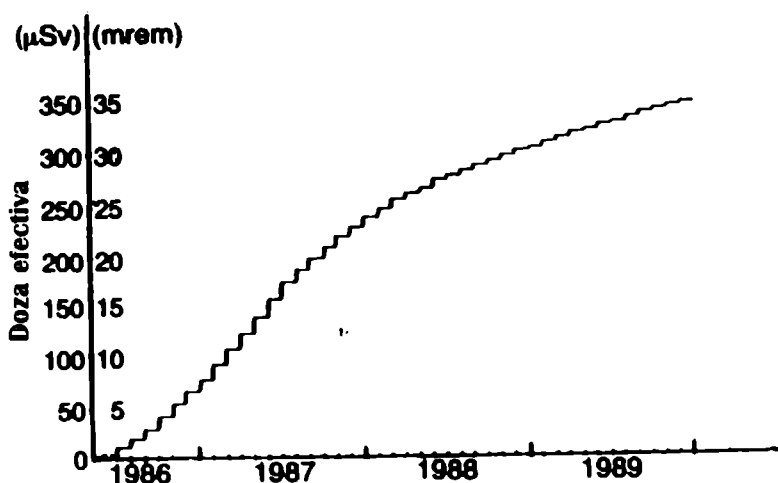


Fig. 17.10: Cumularea EDE mediu în corpul uman, în perioada octombrie 1986 - decembrie 1989 în București (ref. [39])

Se observă foticurile ^{137}Cs (662 keV), ^{134}Cs (797 keV), datorate contaminării interne și foticul de 1460 keV (^{40}K) datorat potasiului radioactiv existent în mod natural în corpul omenesc. În fig. 17.9 este ilustrată variația contaminării medii a celor 2883 de subiecți cu $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$, în perioada iulie 1986 - decembrie 1989. Se observă creșterea rapidă a radioactivității umane

BIBLIOGRAFIE

1. G. Gamov - *O planetă numită Pământ*, Ed. Științifică, București (1968)
2. G. Favero - *L' evolutione del sistema solare*; Armando Curcio Editore, Roma (1986)
3. S. Airinei - *Geofizica*; Universitatea București, București (1972)
4. L. A. Peršov - *Prirodnaia radioaktivnosti biosferî*; Atomizdat, Moskva (1964)
5. M. Eisenbud - *Environmental Radioactivity*; Mc Graw-Hill, New York (1963)
6. R. Ion-Mihai - *Introducere în fizica nucleară* ; curs predat la Facultatea de Fizică, Universitatea București (1982-1998)
7. G. Vlăducă - *Elemente de Fizică Nucleară*, Universitatea București, București (1988)
8. M. Tubiana, J. Dutreix - *Bases physiques de la radiotherapie et de la radiobiologie*; Mason et Curie (1963)
9. *Biophysical aspects of radiation quality*; Technical Reports Nr. 58; IAEA, Viena (1966)
10. N. Gheorghe, C. Vlădescu, M. Apetroae - *Radiațiile ionizante si viața*; Ed. Academiei, București (1984)
11. Societatea Română de Radioprotecție - *Radioactivitatea naturală în România*; București (1994)
12. Societatea Română de Radioprotecție - *Radioactivitatea artificială în România*; București (1994)
13. Consiliul Național de Protecție Radiologică din Marea Britanie (1987) - *Trăim cu radiații*; Ed. Tehnică, București (1989)
14. *Radiation: Doses, Effects, Risks*, UNEP 1985
15. Yu. M. Șirokov, N. P. Yudin - *Iadernaia Fizika*; Fiz-Mat Literatura, Moskva (1980)
16. H. Frauenfelder, E. Henley - *Subatomic Physics*; Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey (1974)
17. E. Gaspar - *Trasori în sisteme acvifere*; Ed. Academiei Române, București (1994)
18. K. M. Muhin - *Fizică nucleară experimentală*; Ed. Tehnică, București, (1982)
19. P. Raicu, V. Stoian - *Gene si cromozomi*; Ed. Științifică și Enciclopedică, București (1989)
20. D. Lal, H. E. Suess - *The radioactivity of the Atmosphere and Hydrosphere*; Ann. Rev. Nucl. Sci. 18, p. 407 (1968)
21. H. L. Brode - *Review of Nuclear Weapons Effects*; Ann. Rev. Nucl. Sci. 18, p. 153 (1968)
22. A. C. Upton - *Effects of Radiation on Man*; Ann. Rev. Nucl. Sci. 18, p. 495 (1968)
23. W. C. Francis - *Materials for Water-Cooled Reactors*; Ann. Rev. Nucl. Sci. 18, p. 465 (1968)
24. R. S. Cooper - *Nuclear Propulsion for Space Vehicles*; Ann. Rev. Nucl. Sci. 18, p. 203 (1968)
25. V. Brodin - *Radioactive Contamination*; New York (1975)
26. A. Cecal - *Implicati ale fisurii nucleare*; Ed. Tehnica, București (1985)

27. A. Cecal - Aspecte chimice ale energiei nucleare, Ed. Tehnica, București (1989)
28. *Meteorology and Atomic Energy*; prepared by U. S. Department of Commerce Weather Bureau for U. S. Atomic Energy Commission, Washington, D. C, (1955, reed. 1968)
29. G. Medvedev - *Adevărul despre Cernobâl*; Ed. Humanitas, București (1992)
30. J. Ancellin, P. Gueguet, P. Germain *Radioecologie marine*; Ed. Eyrolles, Paris (1979). -
31. Gh. Marcu, T. Marcu - *Elemente radioactive în poluarea mediului și riscurile iradierii*, Ed. Tehnică, București (1996)
32. J. Priest - *Problems of our Physical Environment. Energy, Transportation, Pollution*; Addison-Wesley Publishing Company (1973)
33. Proc. of Symp. *Environmental Behavior of Radionuclides released in the Nuclear Industry*, held in Aix-en-Provence, 14-18 May 1993, IAEA, Vienna (1993)
34. Hadzima Matuda, Kasiva Haiasi - *Arma nucleară și omul*; Ed. Științifică București, 1961
35. C. M. Lederer, V. S. Shirley - *Tables of Isotopes*; John Wiley & Sons, Inc., New York. Chichester. Brisbane. Toronto (1978)
36. M. Oncescu *Conceptele radioprotecției*; Ed. Horia Hulubei, București-Măgurele (1996)
37. M. Alexandrescu, A. Baci, F. Baci, C. Dovlete, I. Osvath, Gy. Rusza, N. Sonoc, S. Sonoc, A. Stoiciu, E. Suto 1992-Raport Anual asupra Radioactivității Mediului în România; Laboratorul de Radioactivitatea Mediului, București (1994)
38. 1996-Raport asupra Radioactivității Factorilor de Mediu pe teritoriul județului Argeș - România
39. C. Dumitru, C. Lungu, S. Iosif, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol.42, pp 45-49(1992), Nuclear Technology Publishing
40. I. Chiosilă, *Radioecologie, managementul accidentului nuclear*, Ed. Universității din București (1996)
41. Institutul de Fizică Atomică, *Standarde de bază de radioprotecție*, IFA București, 1991.
42. International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Pergamon Press, 1977.
43. International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press, 1990.
44. Societatea Română de Radioprotecție, *Recomandările din 1990 ale Comisiei Internaționale de Protecție Radiologică* (ICRP Publicația 60), traducere a lucrării ICRP Publication 60, București, 1996.
45. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, 1988 Report to the General Assembly, with annexes, United Nations, New York, 1988.
46. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, 1993 Report to the General Assembly, with annexes, United Nations, New York, 1993.
47. AIEA Bulletin 39/3/1997

VERIFICAT
2017

VERIFICAT
2007



DATA RESTITUIRII

26. FEB. 2002	17 APR 2006	14 APR 2018
26. FEB. 2002		17 APR. 2018
11 NOV	09. MAI 2014	
12 NOV 2002	03 MAI 2013	
13. NOV 2002	09. MAI 2013	
19 MAR 2004	19.5. 2010	
19 MAR 2004		
15 NOV 2004		
20 IAN. 2005		
24 IAN. 2005	28 FEB 2017	
29 MAR 2005		
16. MAI. 2005	03 febr 2018	



DE SPIRITU ET ANIMA

ISBN: 973-575-278-6

Lei 194/01