

614.8
738

UNIVERSITATEA DE STAT DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE
„NICOLAE TESTEMIȚANU”
CENTRUL NAȚIONAL ȘTIINȚIFICO-PRACTIC DE MEDICINĂ PREVENTIVĂ

IGIENA RADIAȚIILOR

Manual

645 2 235
32

UNIVERSITATEA DE STAT DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE
NICOLAE TESTEMIȚANU

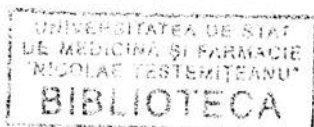
CENTRUL NAȚIONAL ȘTIINȚIFICO-PRACTIC DE MEDICINĂ PREVENTIVĂ

IGIENA RADIAȚIILOR

Manual

Sub redacția prof. univ., dr.hab. șt. med.,
Gheorge OSTROFEȚ

690152



sl

Chișinău
Centrul Editorial-Poligrafic *Medicina*
2009

CUVÂNT ÎNAINTE

Noțiunea de radioactivitate este relativ nouă, dar odată cu descoperirea radioactivității omenirea a pășit în era marilor descoperiri științifice grație utilizării surselor cu radiații ionizante. Astfel, au fost posibile o serie de descoperiri științifice atât ale macrolumii (cosmosul), cât și ale microlumii (particulele elementare și microstructura materiei vii). Sursele de radiații ionizante sunt folosite în prezent practic în toate domeniile științei și tehnicii, în energetică, industrie, agricultură, construcții etc. Din păcate, sursele de radiații ionizante sunt folosite nu numai în scopuri pașnice, dar și la producerea armelor nucleare și termonucleare. Indiferent de sfera de utilizare, sursele de radiații ionizante prezintă un potențial risc dacă nu se respectă cerințele și normele de radioprotecție și securitate nucleară.

În medicină sursele de radiații ionizante și-au găsit o răspândire extrem de largă în diagnosticul, tratamentul și profilaxia bolilor.

Manualul reprezintă o lucrare structurată logic, într-un mod cât mai accesibil pentru însușirea și înțelegerea noțiunilor ce fac parte din diferite discipline, inclusiv din fizica atomului, fizica nucleară, dozimetria, radiobiologia, radiochimia, radioprotecția, securitatea nucleară etc. Lucrarea conține informații despre istoria descoperirii și dezvoltării tehnologiilor de utilizare a radiațiilor ionizante, aspectele fizico-chimice ale radiațiilor ionizante, unitățile de măsurare cantitativă a radiațiilor ionizante, efectele biologice primare ale radiațiilor ionizante, relațiile efecte–doze mici, problemele cercetării epidemiologice în evidențierea acțiunii dozelor mici ale radiațiilor ionizante asupra sănătății populației, reglementarea igienică a iradierii omului, componentele fondului radioactiv natural, sursele artificiale de radiații ionizante, utilizarea radiațiilor ionizante – beneficii și dezavantaje, transportarea surselor și deșeurilor radioactive, stocarea surselor și deșeurilor radioactive, aspectele ecologice ale poluării mediului ambiant cu radiații ionizante, incidentele cu radiații ionizante, accidentele majore cu radiații ionizante, caracteristica accidentului nuclear de la Cernobâl, evaluarea factorilor de risc asociați iradierii ionizante etc.

Exprimăm un sentiment de recunoștință față de autorii de diferite specialități, care și-au dat concursul în elaborarea acestui manual.

Autorii nu pretind că în acest manual au epuizat problematica complexă a Igienei Radiațiilor și Radioprotecției. Astfel, ei vor fi recunoscători colegilor, specialiștilor în domeniu pentru opiniile critice și sugestiile corespunzătoare în vederea completării și perfecționării acestei ediții.

**Gheorghe Ostrofeț, dr. hab. med., prof.univ.,
șeful catedrei Igienă Generală a USMF „Nicolae Testemițanu”**

INTRODUCERE

Orice materie ce ne înconjoară – atât pe Pământ cât și în Univers – constă din substanță și câmp. Particulele substanței – atomii – interacționează prin intermediul câmpurilor: gravitațional, electromagnetice, nucleare, care la rândul lor constau din cuante ale radiațiilor electromagnetice, leptoni, mezoni etc.

Particularitatea principală a radiațiilor de energii înalte asupra substanței este efectul ionizant. Anume de aceea acest tip de radiații se numesc radiații ionizante. Efectul de ionizare se produce cu aceeași probabilitate atât în moleculele (atomii) substanțelor anorganice, cât și în moleculele organice, inclusiv în sisteme biologice – organisme vii.

Radiațiile ionizante posedă un grad de penetrare diferit. Astfel, particulele α , ale izotopilor radioactivi, pierd energia pe un interval foarte scurt, ionizând abundant materia – până la 5000 de perechi de ioni la 1 μm de parcurs. Din această cauză particulele α pătrund în interiorul substanțelor doar cu zecimi de mm, fiind absorbite, practic complet, de stratul cornos al epidermei pielii omului.

Concomitent, radiațiile intervalului optic nu au o capacitate penetrantă mare – ea nu depășește fracțiuni de mm pentru razele ultraviolete și razele infraroșii cu lungimea de undă lungă; o parcurgere maximă de 1-3 mm se stabilește pentru undele roșii și infraroșii apropiate spectrului. Capacitatea de ionizare produce anumite efecte medico-biologice la interacțiunea cu țesuturile organismului uman. Efectele pot fi reversibile și ireversibile. Pentru prevenirea impactului radiațiilor ionizante asupra organismului uman sunt elaborate și aprobate un complex de măsuri de radioprotecție și securitate nucleară. Anume proprietăților radiațiilor ionizante și radioprotecției este consacrat acest manual, care, din păcate, a lipsit în Republica Moldova până în prezent.

Manualul *IGIENA RADIAȚIILOR* a fost elaborat de un colectiv de autori din cadrul CNȘPMP și de la catedra Igienă Generală a USMF „N. Testemițanu” și conține 6 părți, 30 de capitole, bibliografie, lista abrevierilor și glosar. Expunerea materiei este efectuată în baza actelor normative în domeniu ale OMS, AIEA, UE și actelor normative în domeniu în vigoare în Republica Moldova.

Igiena Radiațiilor este știința care studiază particularitățile radiațiilor ionizante, acțiunea și efectele medico-biologice ale lor asupra organismului uman, principiile și eficiența măsurilor adecvate de radioprotecție.

Scopul manualului este de a acorda informația actuală necesară în domeniul Igienei Radiațiilor pentru pregătirea universitară și postuniversitară a medicilor.

Obiectivele manualului Igiena Radiațiilor:

- bazele Igienei Radiațiilor;
- aspecte fizico-chimice ale radiațiilor ionizante;
- efectele medico-biologice ale radiațiilor ionizante;
- riscul asociat iradierii ionizante;
- reglementarea igienică a expunerii organismului uman la radiații ionizante;
- radioactivitatea naturală;
- radioactivitatea artificială;
- deșeurile radioactive;
- aspecte ecologice ale poluării mediului ambiant cu radiații ionizante;
- accidente cu radiații și urgențele radiologice.

Partea I.

BAZELE IGIENEI RADIAȚIILOR

Capitolul 1.

ISTORIA DESCOPERIRII ȘI DEZVOLTĂRII TEHNOLOGIILOR UTILIZĂRII RADIAȚIILOR IONIZANTE

Omenirea pentru prima dată a aflat despre existența unui univers invizibil al radiațiilor ionizante și a luat primele cunoștințe despre efectele lor cu circa 114 ani în urmă. În decembrie a. 1895, profesorul Institutului de Fizică al Universității din Würzburg, Wilhelm Roentgen, pentru prima dată a comunicat lumii științifice despre descoperirea unui nou tip de raze, pe care le-a numit „raze X” (astăzi ele îi poartă numele – raze Roentgen). Aceste raze posedau proprietăți uimitoare: treceau cu ușurință prin substanțe netransparente pentru lumina obișnuită – lemn, carton și țesuturile corpurilor vii.

Descoperirea „razelor-minune” a inundat cu repeziciune publicațiile fizi-co-științifice din întreaga lume, mai apoi și paginile ziarelor cotidiene, stârnind un șir de senzații, speranțe și spirite aprinse.

Noile raze au atras atenția diverșilor savanți, nu doar a fizicienilor. Biologii și medicii au văzut în ele un instrument perfect pentru studiul structurii interne a organismelor, diagnosticul și tratamentul diferitor boli. Doar într-un singur an, de la prima relatare despre descoperirea și aplicarea lor în medicină, au fost publicate circa 1000 de articole și 49 de monografii.

Razele Roentgen au fost doar primele în cascada descoperirilor ingenioase, ce au relevat existența unui microunivers neperceput al particulelor elementare, forțelor misterioase ce mențin structura atomului. În acea perioadă, la începutul sec. XX, cei mai iluștri savanți nici nu-și imaginau, că marele descoperiri științifice din domeniul microuniversului peste patru decenii vor determina obținerea controlului asupra forțelor și energiilor gigantice conținute în nucleele atomilor. Știința fizică, care spre finele sec. XIX considera că este foarte aproape de cunoașterea deplină a universului, brusc s-a pomenit în fața unei probleme complet necunoscute. S-a constatat, că aspectul fizic al universului nu este pe deplin înțeles.

Savanții și-au concentrat atenția și energia rațiunii lor spre acest domeniu misterios și enigmatic al universului. În februarie a. 1896, doar după două luni de la descoperirea razelor Roentgen, Antoine Becquerel, într-o ședință a Academiei de Științe din Paris, a comunicat despre descoperirea unui nou tip

de radiații penetrante. La început savantul considera că aceste radiații sunt nu altceva decât o componentă a fluorescenței. Însă dintr-o întâmplare fericită el a ales în calitate de substanță fluorescentă o sare de uraniu și curând a constatat că această sare generează radiații penetrante indiferent de faptul dacă a fost sau nu, înainte de aceasta, iluminată cu lumină vizibilă. A devenit clar, că însuși uraniul sau compușii lui chimici emană radiații cu proprietăți asemănătoare cu razele Roentgen. Însă această comunicare la început nu a fost luată în serios.

Lucrările soților Curie au clarificat importanța descoperirii lui Becquerel, ei au studiat minuțios fenomenul de emanare a radiațiilor de către uraniu și alte metale cu astfel de proprietăți, pe care l-au numit *radioactivitate*. Noul element radioactiv descoperit de ei a fost numit în cinstea patriei lor – Poloniu. El și-a găsit locul în căsuța nr.84 a Sistemului Periodic al lui Mendeleev, care era liberă până atunci. Spre sfârșitul a.1898, Maria Sklodowska și Pierre Curie au mai descoperit încă un element radioactiv – Radiul, care a ocupat căsuța nr. 88 a aceluiași tabel. Cercetările soților Curie au constituit piatra de temelie a unei noi științe despre radioactivitate.

În a. 1901 Premiul Nobel în fizică a fost decernat lui W. Roentgen; în a. 1903 – lui A. Becquerel și soților Curie, pentru descoperirea radioactivității; în a. 1911 Mariei Sklodowska-Curie i-a fost decernat a doua oară Premiul Nobel pentru separarea în stare metalică a Radiului.

După descoperirea Poloniului și a Radiului au fost descoperite și alte elemente radioactive. În special s-a constatat că practic toate elementele grele (începând de la căsuța 84 până la căsuța 92) sunt radioactive. În 1906 a fost stabilită și radioactivitatea Potasiului (mai precis a izotopului Potasiu-40) – element prezent în orice celulă vie.

În această perioadă mai mulți cercetători talentați au descoperit alte fenomene și efecte din domeniul fizicii elementare: particulele alfa (α), particulele beta (β) și radiația gama (γ), au efectuat și alte descoperiri fundamentale.

Cascada descoperirilor de la sfârșitul sec.XIX – începutul sec. XX a pus în fața savanților necesitatea de a sistematiza și descifra noile descoperiri și de a dezvolta o teorie ce ar putea să le explice. Era necesar de a stabili ce reprezintă razele Roentgen și radioactivitatea, care este natura fizică a lor, prin ce se explică proprietățile deosebite ale lor, din ce surse energetice se obține energia necesară, conform căror legități se propagă în spațiu și, în sfârșit, cum influențează ele asupra materiei vii. Răspunsurile la toate aceste întrebări au fost obținute doar în urma unor cercetări asidue, sofisticate și ingenioase, care au durat mai multe decenii.

Razele descoperite nu încetau să frapeze imaginația. S-a constatat că emanarea radiației de către elementele radioactive nu depindea de compoziția chimică a substanțelor din structura cărora ele făceau parte, nici de temperatură și presiune în toată scara posibilităților tehnico-științifice pe care savanții o aveau la dispoziție în acea perioadă. Devenea clar, că la baza fenomenului de radioactivitate stau legitățile fizice, care nu depindeau de interacțiunea atomilor și moleculelor și nici de starea învelișurilor lor electronice. Pe de altă parte, s-a constatat, că emanarea radiației de către un element radioactiv se micșorează în timp conform unei legități caracteristice elementului dat. Unele elemente își pierdeau radioactivitatea repede, altele mai încet sau nu se observa careva schimbare, în procesul căreia elementul suferea schimbări de natură fizică semnificativă, dezintegrându-se, dând naștere altui element. Ca măsură de existență a elementelor radioactive a devenit perioada de înjumătățire – perioada, în decursul căreia activitatea (intensitatea iradierii) se micșorează de două ori. Astfel, perioada de înjumătățire a Poloniului constituie 138 de zile, a Radiului – 1620 de ani, iar a Uraniului – 4,5 mlrd. ani.

Mult timp era enigmatică proveniența sursei de energie care asigură procesul de emanare a radiațiilor de către elementele radioactive. Încă în 1903, Pierre Curie a observat, că Radiul nu doar emană radiații ionizante, dar concomitent cu aceasta emană și căldură. Calculele, pe care le-a făcut privind cantitatea de căldură degajată în urma dezintegrării radioactive, au arătat niște valori impunătoare și impresionante. S-a stabilit că un gram de Radium-226 în întreaga sa perioadă de existență degajă energie sub formă de căldură de 400 mii ori mai mult decât un gram de cărbune.

Așadar, studiul radioactivității nu doar a apropiat savanții de conceperea bazelor fundamentale ale universului, dar a arătat calea spre valorificarea cantităților gigantice de energie concentrate în interiorul atomilor. Pătrunderea în esența legilor microuniversului a constituit o direcție principală de dezvoltare a științei în sec.XX, iar perspectiva utilizării energiei atomice este o direcție prioritară în progresul tehnico-științific.

Atomul – partea cea mai mică indivizibilă a materiei – ca o concepție a apărut încă în perioada Greciei Antice, dar a fost obiectul investigațiilor științifice reale abia la începutul secolului XX. Evoluția concepțiilor științifice despre structura și proprietățile lui este legată de astfel de personalități notorii ca Ernest Rutherford (1871-1937), Niels Bohr (1885-1962), Albert Einstein (1879-1955) și alții.

Dimensiunile atomului sunt foarte mici. Diametrul – circa $2 \times 10^{-10} \text{m}$. Masa celui mai ușor element – Hidrogenul – constituie $1,67 \times 10^{-27} \text{kg}$, iar masa atomului Uraniului este de 238 de ori mai mare. Se cunosc elemente și mai grele, care, însă, sunt obținute artificial.

Particulele constructive ale atomului real ocupă o parte foarte mică din volumul minuscul al atomului. Cea mai mare parte din masa atomului (99,95%) este concentrată în nucleu, diametrul căruia este de 10^{-15}m și aproximativ de 50-100 mii de ori mai mic decât diametrul atomului. Densitatea substanței în nucleu este foarte mare – 1014kg/dm^3 .

Nucleul atomului întotdeauna este încărcat pozitiv, iar în jurul lui pe anumite orbite se rotesc pe traectorii complicate electronii – particule încărcate negativ, sarcina electrică a electronului fiind de $1,60 \times 10^{-19} \text{C}$. Masa electronului este de 1840 ori mai mică decât masa atomului de Hidrogen și constituie $9,11 \times 10^{-31} \text{kg}$. Într-un atom neutru numărul electronilor de pe orbitele atomului coincid cu suma sarcinilor pozitive din nucleu. Anume sarcina pozitivă a nucleului determină poziția elementului dat în succesiunea elementelor din Sistemul Periodic al elementelor al lui Mendeleev, descoperit în 1869.

Capitolul 2.

ASPECTE FIZICO-CHIMICE ALE RADIAȚIILOR IONIZANTE

2.1. Structura atomului

Experiențele efectuate de Rutherford (1913) au arătat că atomul este format dintr-un nucleu, în care este concentrată aproape întreaga masă a atomului, și electroni, care se mișcă în jurul nucleului. Aceleași experiențe au stabilit că nucleul este încărcat cu sarcină electrică pozitivă, iar numărul Z care determină această sarcină pozitivă este egal cu numărul de ordine în Sistemul Periodic al elementelor și, deci, egal cu numărul electronilor din atomul neutru.

Electronul este particula cu cea mai mică sarcină electrică, așa-numita sarcină electrică elementară, care are valoarea:

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}.$$

Așadar, sarcina celor Z electroni din atom este egală cu de Z ori sarcina electrică elementară negativă. Deoarece atomul este neutru din punct de vedere electric, el trebuie să conțină de Z ori sarcina elementară pozitivă. Printr-

un calcul relativ simplu se poate găsi ordinul de mărime al razei atomului. Să presupunem că într-un corp solid oarecare atomii se găsesc sub forma unor sfere tangente între ele, cu raza r_a . Un kilomol va conține un număr de atomi egal cu numărul lui Avogadro (N_A).

Volumul acestui atom-gram va fi:

$$V = \frac{4}{3} \pi r_a^3 N_A.$$

Masa M a unui kilomol reprezintă masa moleculară exprimată în kg.

Cunoscând densitatea ρ a solidului, putem afla raza r_a a atomului din relația:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi r_a^3 N_A}, \text{ unde } r_a = \sqrt[3]{\frac{M}{\frac{4}{3} \pi \rho N_A}}.$$

Astăzi se cunosc o serie de fenomene ce confirmă faptul că electronul este nelipsit din constituția substanței. Așa, de exemplu, în fenomenul de electrizare prin frecare se produce un transfer de electroni între cele două corpuri. Electronii sunt emiși la iradierea anumitor substanțe cu radiații ultraviolete sau la încălzirea unor substanțe până la incandescență.

Faptul că electronii pot fi emiși de diferite substanțe în diverse procese a condus la concluzia că electronul este un constituent universal și fundamental al substanței.

2.2. Structura protono-neutronică a nucleului

Cel mai mic nucleu este nucleul atomului de hidrogen și se obține prin scoaterea electronului din atomul de hidrogen. Acest nucleu are sarcină electrică pozitivă egală în valoare absolută cu sarcina electronului (deci $Z = 1$), iar masa lui este de 1 836 ori mai mare decât masa electronului. Rutherford (1914) a propus ca acest nucleu să fie considerat ca unitate de sarcină electrică și 1-a numit proton (de la cuvântul grec „primul”, deoarece este nucleul primului element din Sistemul Periodic).

Apare întrebarea: Cum sunt formate nucleele celorlalte elemente mai grele? O primă ipoteză ar fi aceea că ele sunt formate din protoni, însă ipoteza prezintă imediat dificultăți. Într-adevăr, dacă ar fi așa, nucleul atomului de

Heliu (care are numărul de masă 4) ar trebui să conțină patru protoni și deci să aibă sarcina $+4e$; se știe, însă, că el are sarcina $+2e$. La fel stau lucrurile și cu alte elemente; de exemplu, nucleul de Carbon are numărul de masă 12 și dacă ar fi format din 12 protoni ar trebui să aibă sarcina electrică $+12e$, însă se știe că sarcina lui este $+6e$.

Pentru a evita această dificultate, s-a presupus că nucleele conțin pe lângă protoni și electroni; apare astfel modelul protono-electronic al nucleului, care a persistat până pe la 1930.

După descoperirea neutronului a apărut imediat modelul protono-neutronic al nucleului (Heisenberg, Ivanenko, Tamm, 1932), care presupune că nucleul este format din protoni și neutroni. În acest caz numărul de ordine al unui nucleu este egal cu numărul de protoni din nucleu, iar numărul de masă este egal cu numărul de protoni plus numărul de neutroni. Prin urmare, folosind notațiile obișnuite pentru un nucleu, A_ZX , numărul de protoni este Z , iar numărul de neutroni este egal cu $N = A - Z$. Cu ajutorul acestui model se puteau explica toate datele experimentale care erau cunoscute, inclusiv cele care nu au putut fi explicate pe baza modelului protono-electronic. Existența izotopilor unui element se explică ușor prin aceea că numărul de protoni este același, însă diferă numărul de neutroni; de exemplu ${}^{16}_8O$ are 8 protoni și 8 neutroni, în timp ce ${}^{18}_8O$ are 8 protoni și 10 neutroni. În funcție de valorile pe care le pot lua A și Z , nucleele se clasifică în: izotopi, izobari și izotoni. Izotopii sunt nuclee caracterizate prin același număr atomic Z și numere de masă diferite.

Exemplu: izotopii hidrogenului – 1_1H , 2_1H , 3_1H (hidrogen, deuteriu și tritiu).

În natură se găsesc peste 280 de izotopi stabili și mai mult de 700 izotopi radioactivi.

Izobarii sunt nuclee caracterizate prin același număr de masă A și având numere atomice diferite.

Exemplu: nucleele ${}^{27}_{12}Mg$ și la ${}^{27}_{13}Al$.

De regulă, izobarii stabili se găsesc în perechi, adică unei valori date a numărului de masă A îi corespund doi izobari; există și triade de izobari. Perechile de izobari stabili apar începând cu $A = 36$. În prezent se cunosc aproximativ 60 de perechi de izobari stabili.

Nuclizii cu același N , dar cu A și Z diferiți se numesc izotoni.

Modul simbolic de scriere se extinde și la nucleoni.

Deci, simbolic, vom nota protonul cu 1_1p și neutronul cu 1_0n .

Cele mai multe specii de atomi se pot caracteriza, așa cum s-a menționat mai sus, prin numărul atomic și numărul de masă; există însă și scrierea simplificată în care un nuclid este descris prin numele elementului și numărul de masă: X-A.

Exemplu: Li-7, C-14, Ba-140.

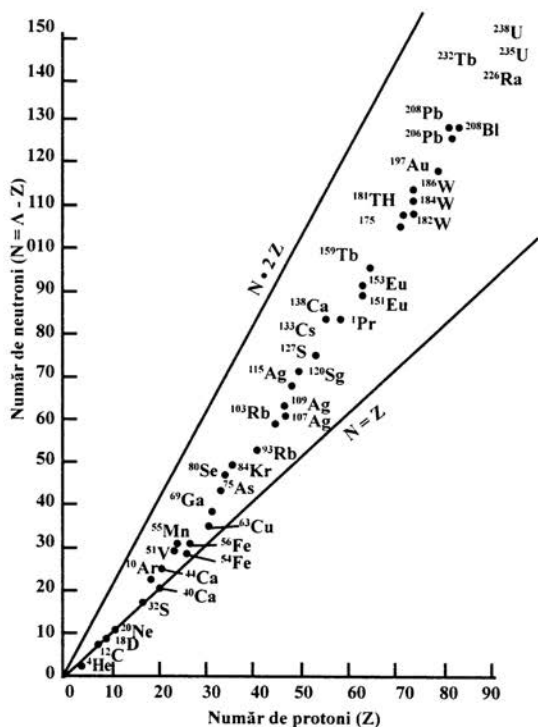


Fig. 1. Variația numărului de neutroni în funcție de numărul de protoni.

Analizând componența nucleelor, se constată că la nucleele ușoare stabile numărul protonilor este egal sau aproape egal cu numărul neutronilor; ${}^4_2\text{He}$ conține 2 protoni și 2 neutroni; ${}^{12}_6\text{C}$ conține 6 protoni și 6 neutroni, ${}^{15}_7\text{N}$ conține 7 protoni și 8 neutroni, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ (cel mai răspândit izotop al calciului) conține 20 de protoni și 20 de neutroni. Odată cu creșterea numărului de protoni peste aproximativ 20, numărul de neutroni crește mai repede decât numărul de protoni. Acest lucru se vede din *figura 1*, unde am reprezentat numărul de neutroni în funcție de numărul de ordine și unde punctele negre reprezintă izotopii stabili cei mai răspândiți în natură ai unor elemente din Sistemul Periodic. Izotopii cu $A > 209$ nu sunt stabili, însă se găsesc în natură, deoarece au timpul de înjumătățire foarte mare sau aparțin unor serii radioactive în care un element are timpul de înjumătățire foarte mare. Din *figura 1* se observă că

nucleele stabile se află între dreptele $N = Z$ și $N = 2Z$, situându-se pe prima dreaptă pentru nucleele ușoare și apropiindu-se de dreapta $N = 2Z$ pentru nucleele grele. O primă concluzie ce se obține din analiza acestor date este aceea că între protoni și neutroni trebuie să existe forțe de atracție mai puternice decât forțele de repulsie de natură electrostatică care se exercită între protoni. Deși aceste forțe se exercită și între protoni, ele presupun existența neutronilor în nucleu; acest lucru se deduce imediat din faptul că nu se cunoaște nici un nucleu stabil care să conțină mai mult decât un proton și să nu conțină un număr oarecare de neutroni.

Trebuie să menționăm că putem privi protonul și neutronul ca o aceeași particulă cu sarcină electrică unu sau zero; această particulă se numește nucleon.

2.3. Caracteristici generale ale nucleului

Proprietățile importante ale nucleului sunt determinate de câteva mărimi fizice esențiale: masa, sarcina electrică și momentul cinetic.

a) Masa nucleului. În nucleu este concentrată aproape întreaga masă a atomului; deoarece este foarte greu să se măsoare masa unui nucleu, în majoritatea tabelelor se dau masele atomilor, masa unui atom fiind egală cu masa nucleului plus masa electronilor. De obicei, masa atomilor se exprimă în unități atomice de masă u ; aceasta se definește ca fiind $1/12$ din masa unui atom al nuclidului C^{12} . Ținând seama de valoarea masei atomului C^{12} , rezultă că între unitatea atomică de masă și kg există relația:

$$1 u = 1,66044 \cdot 10^{-27} \text{kg}.$$

Exprimând masa diferitor izotopi în unități atomice de masă se constată că aceasta este, cu excepția unor mici diferențe, un multiplu întreg; mai mult, se observă că masa unui izotop oarecare este aproximativ un multiplu întreg al masei unui nucleon, acest multiplu fiind numărul de masă.

b) Sarcina nucleului este pozitivă și egală cu Ze , unde Z este numărul atomic (numărul protonilor din nucleu), iar e este valoarea absolută a sarcinii electronului. În prezent se cunosc nuclee cu Z cuprins între 1 (protonul) și 103 (lawrenciu). Elementele cu numerele atomice 43 (technețiu), 61 (promețiu), 85 (astatinu) nu se găsesc în natură, ca de altfel și toate elementele cu $Z > 92$, cu excepția plutoniului ($Z = 94$) care se află în proporție foarte mică în conținutul pehblendei.

c) Momentul cinetic al nucleului, denumit uneori și spinul nucleului, constituie o altă caracteristică importantă a nucleului. Existența momentului

cinetic al nucleului a fost stabilită pe cale experimentală în studiul structurii hiperfine a liniilor spectrale.

Măsurându-se momentul cinetic al diferitor nuclee, s-a putut trage o serie de concluzii:

- nucleeele par-pare (Z -par, A -par) au momentul cinetic zero;
- nucleeele impare (A -impar) au momentul cinetic zero;
- nucleeele impar-impar (Z -impar, N -impar) au momentul cinetic întreg.

Aceste observări sunt în concordanță cu modelul protono-neutronic al nucleului, protonii și neutronii având spinul $\frac{1}{2}$.

Deoarece nucleul posedă un moment cinetic, are și un moment magnetic, a cărui prezență a fost pusă în evidență prin studiul structurii hiperfine în spectrele atomice. Câmpul magnetic al nucleului, interacționând cu câmpul magnetic al electronilor, conduce la o energie suplimentară a electronilor, a cărei valoare depinde de mărimea momentului magnetic al nucleului și de orientarea sa. Această energie nu ia decât anumite valori discrete, al căror număr depinde de momentul cinetic al nucleului, iar valoarea depinde de mărimea momentului magnetic.

2.4. Stabilitatea nucleelor atomice

Nucleul atomic este alcătuit din protoni și neutroni și are raza de aproximativ 10^{-14} m. Forțele electrice, care sunt capabile să explice legarea electronilor în atom, nu pot însă explica cum protonii, încărcăți pozitiv, și neutronii, fără sarcină electrică, pot să formeze sisteme stabile.

Legătura protonilor și neutronilor în nucleu a fost pusă pe seama unui nou tip de forțe – forțele nucleare.

Experiențele de împrăștiere a particulelor alfa pe nuclee au dovedit că forțele nucleare nu se manifestă decât la distanțe foarte mici, de ordinul a 10^{-15} m, spre deosebire de forțele electrice care acționează la distanțe mari. În plus, forțele nucleare trebuie să acționeze între toți nucleonii, indiferent de faptul că aceștia sunt sau nu încărcăți electric, și să fie mult mai intense decât forțele electrice, pentru a compensa respingerea reciprocă a protonilor.

Determinări precise de masă au condus la concluzia că masa unui nucleu nu este riguros egală cu suma maselor protonilor și neutronilor ce intră în componența sa, ci este întotdeauna mai mică. Conform relației dintre masă și energie, stabilită de Einstein,

$$E = M \times c^2,$$

unde E este energia, M – masa, iar c – viteza luminii, rezultă că energia corespunzătoare unui nucleu este mai mică decât suma energiilor nucleonilor liberi ce intră în componența lui.

Pentru descompunerea nucleului în nucleonii componenți este necesar un consum de energie. Această energie este cunoscută sub numele de energie de legătură, W , a nucleului, și este dată de expresia:

$$W = c^2 [Z \times M_H + (A - Z) \times M_n - M],$$

unde M este masa nucleului, M_H – masa protonului, M_n – masa neutronului.

Altfel spus, lucrul mecanic efectuat pentru a desface un nucleu izolat, aflat în repaus, în nucleoni izolați în repaus se numește *energie de legătură a nucleului*.

Dacă masele se exprimă în **kg**, iar viteza luminii în **m/s**, atunci energia de legătură rezultă în jouli. De regulă, însă, masele nucleare se exprimă în **u**, iar energia de legătură în **MeV**. Avem atunci:

$$W = 931,478 \times [Z M_H + (A - Z) M_n - M] \text{ (MeV)}$$

Energia de legătură a nucleului poate fi exprimată și în funcție de masele atomice, care sunt, de obicei, date în tabele. Energia de legătură a electronilor în atomi este atât de mică, încât poate fi neglijată, expresia energiei de legătură nucleară fiind identică, indiferent de faptul că masele sunt cele atomice sau cele nucleare.

Dacă $W_{leg} > 0$, nucleul este stabil.

De exemplu: Să presupunem că $N \rightarrow a + X$, unde a și X sunt particule nucleare, iar nucleul N se poate găsi într-una din următoarele trei stări posibile:

1. o stare legată, în care masa sa este mai mică decât suma maselor particulelor a și X ;
2. o stare metastabilă, în care particula a poate fi expulzată prin efectul de tunel al barierei de potențial;
3. o stare nestabilă, în care nucleul N se desface în particule a și X .

Nucleul N este stabil atunci când energia de legătură satisface condiția:

$$W_{leg}^a > 0$$

De multe ori, în locul energiei de legătură se pot folosi și alte mărimi, ca defectul de masă, definit prin raportul dintre energia de legătură și c^2 , sau

excesul de masă, definit prin diferența dintre masă și numărul de masă, adică

$$\Delta = M - A$$

Se definește energia de legătură pe nucleon ca fiind energia de legătură a unui nucleu împărțită la numărul de nucleoni din nucleu:

$$B = \frac{W_{leg}}{A}$$

O valoare mare a energiei de legătură pe nucleon indică o stabilitate mare a nucleului.

Nucleele de masă intermediară, cu A cuprins între 40 și 140, au energia de legătură pe nucleon maximă, în jurul valorii de 8,5 MeV.

Pentru anumite valori ale numărului de protoni, respectiv de neutroni, există salturi bruște ale energiei de legătură; ele reprezintă cazuri de nuclee deosebit de stabile. Asemenea valori sunt 2, 8, 28, 50, 82, 126 și se numesc numere magice.

La nucleele grele energia de legătură pe nucleon scade până la uraniu, unde atinge aproximativ 7,5 MeV.

Anumiți nuclizi sunt stabili, dar mulți – nu. Un nuclid instabil se transformă în mod spontan în nuclidul altui element și, făcând aceasta, emite radiație.

Această proprietate se numește *radioactivitate*, transformarea se cheamă *dezintegrare*, iar *nuclidul* se zice că este un *radionuclid*.

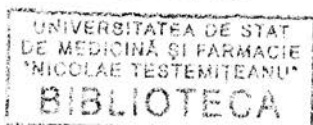
De exemplu: Carbonul-14 este un radionuclid care se dezintegrează în Azot-14, un nuclid stabil. Bariul-140 este un radionuclid care se dezintegrează în radionuclidul Lantan-140 care, la rândul său, se dezintegrează în nuclidul stabil Ceriu-140.

2.5. Radioactivitatea, noțiuni de radioactivitate

În natură există unele substanțe care emit radiații; aceste substanțe se numesc radioactive, iar procesul de emisie spontană a radiațiilor se numește radioactivitate naturală, pentru a o deosebi de emisia radiațiilor de către unele substanțe care sunt produse de om pe diferite căi.

Radioactivitatea naturală a fost descoperită și studiată încă de la sfârșitul secolului trecut (Becquerel, 1896; Marie și Pierre Curie, 1898; Rutherford și Soddy, 1902).

690152



Experiențele efectuate au arătat că procesele radioactive nu depind de condițiile exterioare. Dacă o substanță radioactivă este supusă unor presiuni sau temperaturi mari, nu se schimbă caracteristicile radiațiilor emise; de asemenea, dacă substanța este plasată în câmpuri magnetice sau electrice, sau dacă se schimbă compoziția chimică a ei, caracteristicile radiațiilor nu se modifică. Aceasta înseamnă că emisia radioactivă are loc ca urmare a schimbărilor în nucleu, procesul însemnând schimbarea unui nucleu în altul odată cu emisia de radiații.

După proprietățile pe care le au radiațiile emise de substanțele naturale, ele sunt de trei tipuri: alfa, beta și gama, denumite astfel după primele trei litere din alfabetul grec.

a) Radiația alfa are putere de penetrare foarte mică, fiind formată din particule cu sarcină pozitivă și masă mare; experiențele efectuate de Rutherford au arătat că particulele alfa sunt nuclee de heliu. Radiațiile alfa sunt formate din grupuri de particule cu energii bine determinate, adică spectrul radiațiilor alfa este un spectru discret.

b) Radiațiile beta au putere de penetrare mai mare decât radiațiile alfa. Ele sunt formate din electroni sau pozitroni. Radiațiile beta sunt emise cu toate energiile posibile cuprinse într-un interval larg; zicem că spectrul energetic al radiațiilor beta este un spectru continuu. S-a observat că peste acest spectru se suprapune uneori un spectru discret; radiațiile beta care au spectru discret nu sunt emise de nucleu, ci provin din învelișul atomic de electroni care înconjoară nucleul.

c) Radiația gama are cea mai mare putere de penetrare și nu este deviată de câmpuri electrice sau magnetice. Această radiație este de natură electromagnetică și are lungimea de undă foarte mică. De regulă, radiația gama însoțește radiația alfa și beta.

Radioactivitatea naturală se întâlnește mai ales la elementele de la sfârșitul Sistemului Periodic.

Studiindu-se radioactivitatea elementelor grele, a fost posibilă separarea după proprietățile lor chimice. Pentru a face această separare s-a aplicat o metodă ce constă în dizolvarea substanței radioactive în anumite soluții și folosirea unor agenți de precipitare; unele elemente trec în precipitat, iar altele rămân în soluție și acest lucru se poate constata observând care dintre ele emit radiații. Rezultatele obținute au permis să se grupeze elementele radioactive naturale în patru serii, fiecare element al unei serii obținându-se din altul prin dezintegrare alfa sau beta. Stabilirea elementului, care ia naștere în urma

dezintegrării radioactive, se poate face pe baza legii deplasării radioactive. Această lege stabilește următoarele reguli simple:

– prin emisia unei particule alfa ia naștere un element care se situează în Sistemul Periodic cu două căsuțe mai la stânga (nucleul pierde două sarcini electrice), iar numărul de masă este mai mic cu patru unități atomice;

– prin emisia beta se formează un element care se află cu o căsuță la dreapta (nucleul emite o sarcină negativă).

Deoarece masa electronului emis este foarte mică, nu se schimbă numărul de masă și de aceea elementul care ia naștere este un izobar al primului, având aceeași masă atomică, dar fiind diferit din punct de vedere chimic.

Folosind legea deplasării radioactive, s-au putut stabili seriile radioactive cunoscând capii de serie. Se cunosc patru serii radioactive.

2.6. Caracteristica familiilor radioactive

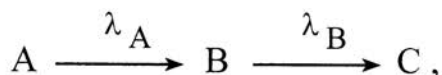
În marea majoritate a cazurilor, dezintegrările radioactive au loc în lanț, speciile radioactive transformându-se unele în altele printr-o întreagă succesiune de dezintegrări radioactive până când se ajunge la un izotop stabil. O asemenea succesiune de specii radioactive înlănțuite formează o serie radioactivă.

Primul radionuclid din serie reprezintă capul seriei, iar nuclidul stabil cu care se termină seria reprezintă capătul seriei radioactive. Diferite specii radioactive sau izotopi radioactivi ce intră în componența seriei radioactive date, la care se adaugă și izotopul stabil ce reprezintă capătul seriei, se numesc termenii seriei radioactive date.

Toți termenii unei anumite serii radioactive reprezintă nuclee genetic legate. Numărul termenilor unei serii radioactive este extrem de variabil. Acest număr este cuprins între numărul minim posibil de 3, ca în cazul seriei radioactive a Stonțiului-90, și 18, ca în cazul seriei radioactive naturale a Uraniului.

Din punctul de vedere al cineticii dezintegrărilor radioactive este extrem de interesant de a urmări evoluția în timp a numărului de nuclee și a activității fiecărui termen al unei serii radioactive.

Fie cea mai simplă serie radioactivă compusă din numărul minim de termeni, serie a cărei reprezentare schematică arată astfel:



unde A și B reprezintă nuclizi radioactivi, iar C este nuclidul stabil sau capătul de serie, iar λ_A și λ_B sunt constantele de dezintegrare ale celor doi radionuclizi.

2.7. Serii radioactive

Definiție. Dacă într-o serie radioactivă timpul de înjumătățire al capului de serie este mult mai mare decât oricare alt timp de înjumătățire al celorlalți termeni ai seriei, atunci, după un anumit interval de timp, între membrii seriei radioactive se stabilește starea de echilibru secular. Se obține că activitățile tuturor membrilor seriei sunt egale, adică:

$$A_A = A_B = A_K$$

În natură majoritatea elementelor radioactive prezente în rocile terestre aparțin la trei serii radioactive naturale, care datorită faptului că au capete de serie cu timpi de înjumătățire comparabili cu vârsta Pământului (cca 5 miliarde de ani) se află toate în stare de echilibru secular.

Deoarece elementele ce alcătuiesc oricare serie radioactivă sunt legate genetic numai prin dezintegrări α și β , în cadrul aceleiași serii radioactive numerele de masă ale tuturor termenilor sunt egale sau diferă numai printr-un multiplu de 4. Din această cauză pot exista maximum patru serii radioactive naturale diferite, numerele de masă ale termenilor acestora având numai una din următoarele forme: $4n$, $4n+1$, $4n+2$ și $4n+3$.

a) Seria Uraniului

Este cea mai importantă dintre cele trei serii naturale (*fig. 114*), în principal din cauza posibilității poluării mediului de către minele de Uraniu (U-238 este folosit drept combustibil de unele tipuri de centrale nucleare). Corespunde formulei $(4k+2)$, având cap de serie izotopul cel mai abundent al Uraniului ($Z=82$), U-238. Istoric, fenomenul radioactivității a fost pus în evidență la începutul secolului trecut prin separarea dintr-o masă mare de minereu de uraniu a unei cantități dintr-un descendent al acestuia, Ra-226 ($T_{1/2}=1600$ ani), substanță necunoscută până atunci. Un alt membru remarcabil al acestei serii este Rn-222 (Radon). Ca indicator pentru această serie se folosește Ra-226.

b) Seria Thoriului

Este a doua serie naturală (*fig. 115*), ale cărei elemente sunt prezente în cantități semnificative în mediu. Importanța ei este oarecum mai mică, de-

oarece sursele de poluare cu elemente din această serie sunt mai rare (mine de Thorium). Are cap de serie izotopul Th-232 ($Z=90$), corespunzând formulei (4k). Ca indicator pentru prezența acestei serii se folosește Ac-228 sau Ra-228, asemănător cu seria Uraniului, are în componența sa un izotop instabil al Radonului, Rn-220, numit și Toron.

Ca și în cazul seriei Uraniului, elementele acestei serii există în concentrații mici, dar nenule în practic toată scoarța terestră, de unde pătrund în toți factorii de mediu.

c) Seria Actinouraniului

Corespunde cu formula (4k+3), cap de serie U-235 (*fig. 117*). Abundența elementelor acesteia în natură este mai redusă. Seria este importantă economic din cauza capului de serie, care este folosit ca materie primă pentru combustibilul utilizat la unele centrale nucleare și la producerea bombei atomice (bomba lansată la Hiroshima a avut miez de U-235). Concentrația U-235 în sol este aproximativ de 10 ori mai mică decât a Ra-226.

d) Seria Neptuniului

Seria corespunzătoare formulei (4k+1) nu se găsește în natură (*fig. 116*). Se presupune că ar fi fost prezentă la formarea Pământului, dar datorită timpului de înjumătățire relativ mic al celui mai stabil membru Np-237 ($T_{1/2}=2,14 \times 10^6$ ani – capul de serie este Pu-241 cu aproximativ 14 ani) practic toată cantitatea existentă inițial s-a dezintegrat până în zilele noastre.

2.8. Tipuri de dezintegrare radioactivă

a) Dezintegrarea alfa. Radiațiile alfa, emise de substanțele radioactive, sunt formate din grupuri monoenergetice de energii bine definite.

Existența grupurilor de particule alfa de diferite energii poate fi înțeleasă dacă se presupune că nucleul care rezultă din dezintegrare poate fi în stare fundamentală sau într-o stare excitată; uneori este posibil ca nucleul inițial care emite radiații alfa să se găsească fie în stare fundamentală, fie într-o stare excitată. În ambele cazuri, radiațiile alfa sunt însoțite de radiații gama, care apar ca urmare a trecerii nucleelor din stări excitate superioare în starea fundamentală sau în stări excitate mai joase. Să considerăm exemplul $^{226}_{88}\text{Ra}$ care emite două grupuri de particule alfa de energii 4,793 MeV și respectiv 4,612 MeV; totodată, apar și radiații gama de energie 0,189 MeV, valoare care în limita erorilor coincide cu diferența dintre energiile grupurilor

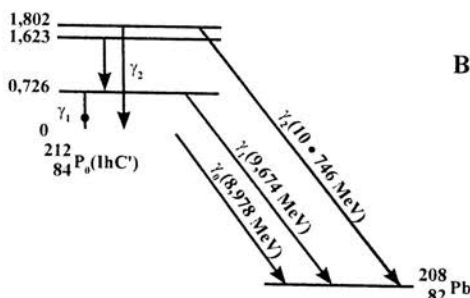
de particule alfa. Cele două grupuri de particule alfa, în cazul analizat, apar datorită faptului că nucleul de $^{222}_{86}\text{Rn}$ ia naștere în stare fundamentală (prin emisia grupului de 4,793 MeV) sau într-o stare excitată (prin emisia grupului de 4,612 MeV), așa cum se vede din *figura 2A*. Acest lucru este confirmat de apariția radiației gama ca rezultat al trecerii nucleelor de Rn din starea excitată în starea fundamentală.

Al doilea exemplu îl constituie grupurile de particule alfa emise de $^{212}_{84}\text{Po}$. În acest caz se emite un grup de energie 8,979 MeV și două grupuri de energie 9,674 MeV și respectiv 10,746 MeV; acestea din urmă au o intensitate foarte mică în comparație cu grupul 8,979 MeV. Apariția celor trei grupuri de particule alfa se explică prin aceea că $^{212}_{84}\text{Po}$ ia naștere din nucleul $^{212}_{83}\text{Bi}$ (ThC), prin dezintegrarea β , fie în starea fundamentală, fie în stări excitate. Nucleele de $^{212}_{83}\text{Bi}$ care iau naștere în stări excitate pot reveni în starea fundamentală prin emisie gama sau se pot dezintegra direct prin emisia unor particule alfa de energie mai mare decât a grupului ce rezultă prin dezintegrarea nucleului din starea fundamentală. Diferența dintre energia grupurilor de particule alfa este egală cu energia radiației gama. Prin urmare, referindu-ne la *figura 2B*, între energia radiațiilor gama și energia grupurilor de particule alfa există relațiile:

$$E_{\gamma_1} = E_{\alpha_1} - E_{\alpha_0} \text{ și } E_{\gamma_2} = E_{\alpha_2} - E_{\alpha_0}.$$

În aceste relații nu s-a ținut seama de energia nucleului de recul (energia cinetică pe care o preia nucleul prin emisia unei particule alfa). Experiența a confirmat apariția radiației gama de energie corespunzătoare diferențelor dintre energia grupurilor de particule alfa. Facem observația că intensitatea grupurilor α_1 și α_2 este mult mai mică decât a grupului α_0 , deoarece probabilitatea de emisie γ este mult mai mare decât cea de emisie α .

A



B

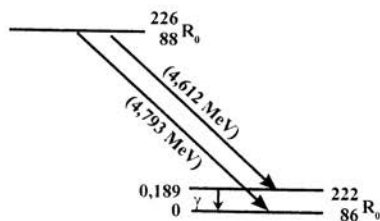
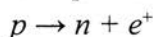
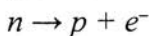


Fig. 2. Schema de dezintegrare

Geiger și Nuttall (1911) au stabilit experimental o lege prin care se face legătura dintre constanta de dezintegrare și viteza particulelor alfa.

$$\ln \lambda = a + b \ln E$$

b) Dezintegrarea beta. Procesul de dezintegrare beta constă în emisia de electroni sau pozitroni de către nuclee. Deoarece în nucleu nu se află electroni sau pozitroni, se poate admite că emisia β^- are loc ca urmare a dezintegrării unui neutron într-un proton și un electron, iar emisia β^+ – prin dezintegrarea unui proton într-un neutron și un pozitron:



Caracteristica principală a dezintegrării beta este existența spectrului continuu: radiațiile beta sunt emise cu toate energiile posibile mai mici decât o anumită energie maximă care limitează superior spectrul (vezi fig. 3).

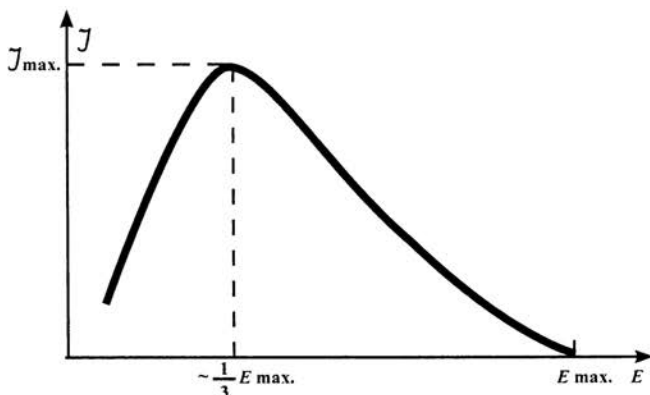


Fig. 3. Spectrul continuu al radiației β .

Maximul intensității are loc la o energie egală cu aproximativ o treime din E_{max} .

Existența spectrului continuu al radiației beta a constituit o dificultate importantă, deoarece părea că în acest caz se încalcă legea conservării energiei: prin emisia beta se trece de la un nucleu într-o stare energetică bine definită la alt nucleu care se află, de asemenea, într-o stare de energie dată. Pentru a explica apariția spectrului continuu, Fermi și Pauli (1934) au presupus că în procesul de dezintegrare beta se emite încă o particulă numită *neutrino*. Această particulă trebuie să fie de masă foarte mică și fără sarcină electrică. Deși este foarte greu de pus în evidență, deoarece n-are sarcină electrică și are masa foarte mică, au fost aduse dovezi directe asupra existenței sale (Allen, 1942; Reines

și Cowan, 1956). Apariția neutrinelui în dezintegrarea beta este impusă și de necesitatea de a explica legea conservării momentului de spin; se admite că neutrinelui are spin $\frac{1}{2} \hbar$.

Considerând că în procesul de emisie beta apare neutrino, se poate scrie pentru emisia β^- și β^+ :

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

În cele două relații, neutrinelui care apare a fost notat diferit, deoarece cele două particule nu sunt identice, deși ambele sunt neutre și au același spin; pentru a le deosebi, particula emisă în dezintegrarea β^+ se numește neutrino, iar cea emisă în dezintegrarea β^- – antineutrino.

Energia pe care o ia un neutrino depinde de unghiul sub care pleacă față de direcția particulei beta. Limita maximă a spectrului corespunde cazului în care neutrino nu preia energie, adică radiația beta preia toată energia. De aceea, energia maximă ar trebui să fie egală cu produsul dintre c^2 și diferența dintre masa nucleului inițial și masa nucleului rezidual; acest lucru a fost confirmat experimental, măsurându-se energia maximă a radiației beta și determinându-se masele nucleelor inițial și final.

Am arătat că prin dezintegrarea beta un nucleu de sarcină Ze și număr de masă A se transformă într-un izobar de sarcină $(Z + 1)e$ (dezintegrarea β^-), sau sarcina $(Z - 1)e$ în cazul emisieii unui pozitron. Aceasta înseamnă că trebuie să fie îndeplinite anumite condiții pentru a avea loc dezintegrarea beta.

Pentru a fi posibilă emisia unui electron, trebuie ca energia corespunzătoare masei nucleului A_ZX să fie mai mare decât cea corespunzătoare sumei maselor nucleului ${}^A_{Z+1}X$ și cea a electronului emis:

$$c^2 M_N(A, Z) > c^2 [M_N(A, Z + 1) + m_0],$$

unde m_0 este masa de repaus a electronului. Se vede că nucleul A_ZX poate emite un electron, dacă masa atomului corespunzător este mai mare decât masa izobarului din căsuța următoare.

Pentru ca un nucleu A_ZX să emită un pozitron, trebuie să fie îndeplinită condiția:

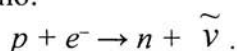
$$M_N(A, Z) > M_N(A, Z - 1) + m_0$$

Dacă în loc de masele nucleare se folosesc masele atomice și dacă ținem seamă că izobarul care ia naștere are cu un electron mai mult decât numărul

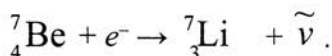
protonilor, se obține pentru relația dintre masele atomice care reprezintă condiția ca dezintegrarea prin emisia unui pozitron să fie posibilă:

$$M_A(A, Z) > M_A(A, Z-1) + 2m_0$$

Uneori dezintegrarea β^+ este concurată de un alt proces, anume captura unui electron de către nucleu. Procesul de captură electronică are loc ca urmare a interacțiunii electromagnetice directe dintre nucleu și electron. Este evident că dacă din punct de vedere energetic este posibilă emisia unui pozitron, atunci este posibilă și captura unui electron; mai mult chiar, captura unui electron poate avea loc și dacă masa atomului A_ZX este doar mai mare decât suma dintre masa atomului ${}^A_{Z-1}Y$ și masa electronului. Electronii sunt absorbiți din păturile inferioare ale atomului, de regulă din pătura K ; de aceea, procesul de captură se numește uneori *captură K* . În urma absorbției unui electron de către nucleu, se transformă unul dintre protonii nucleului într-un neutron și se emite un neutrino:



Deși neutrino este greu de pus în evidență, iar captura K este un proces echivalent din punctul de vedere al transformării cu dezintegrarea β^+ , se poate stabili ușor existența procesului de captură K . Într-adevăr, în urma absorbției electronului de pe pătura K rămâne un loc liber care va fi ocupat de un electron din păturile superioare (L, M, \dots). În acest caz, însă, se emite o radiație X caracteristică, care poate fi pusă în evidență. Un proces de captură K foarte cunoscut este cel descoperit de Allen (1942) în tentativa sa de a pune în evidență neutrino:



De asemenea, un alt exemplu, este cazul ${}^{52}_{25}\text{Mn}$; în acest caz, 35% din nuclee se dezintegrează β^+ , obținându-se ${}^{52}_{24}\text{Cr}$, iar 65% din nuclee se transformă în ${}^{52}_{24}\text{Cr}$ prin captură K . Schema corespunzătoare acestor procese este dată în *figura 4*.

Am arătat la începutul acestui capitol că deseori peste spectrul continuu de electroni se suprapune un spectru format din grupuri monoenergetice de electroni. Faptul că aceste grupuri sunt formate din electroni care provin din învelișul electronic s-a verificat experimental, măsurându-se energiile acestor grupuri și comparându-le cu energiile de legătură ale electronilor de diferite pături. S-a observat că energiile electronilor satisfac relațiile:

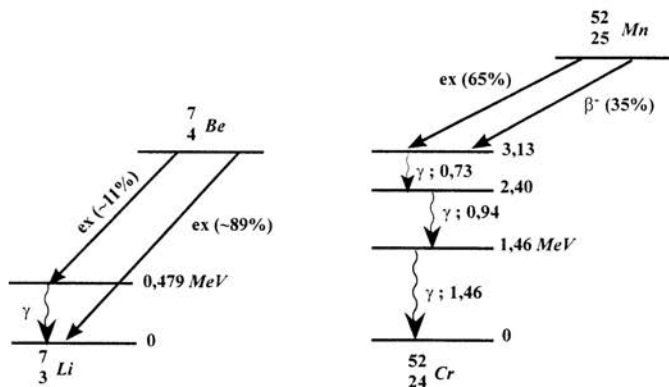


Fig.4. Energiile de legătură ale electronilor de diferite pături.

$$E_1 = W - E_k; E_2 = W - E_L; E_3 = W - E_M,$$

unde E_k, E_L, E_M, \dots sunt energiile necesare scoaterii electronilor de pe păturile K, L, M, \dots , iar W este o constantă, aceeași pentru toate grupurile de electroni.

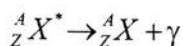
Acest proces apare ca urmare a faptului că un nucleu excitat poate să-și transfere direct energia de excitație electronilor atomici înconjurători. Procesul se numește *conversie internă* și nu trebuie considerat ca datorându-se ciocnirii unei cuante gama, emisă de nucleu și un electron din învelișul atomic, ci ca o interacțiune electromagnetică directă dintre nucleu și electron. După expulzarea electronului apar radiații X caracteristice ca urmare a faptului că locul rămas liber va fi ocupat de electroni exteriori. Studiul acestor raze X permite să se determine energiile de excitație ale nucleelor pe o cale directă, folosind metodele spectroscopiei de raze X .

Din cele discutate mai sus, în legătură cu condițiile de dezintegrare β^-, β^+ sau de captură electronică, rezultă că un anumit nucleu se poate transforma pe una din aceste căi, pe două sau chiar pe toate trei simultan dacă sunt îndeplinite condițiile energetice. În același timp, nucleele care se formează se pot afla fie în starea fundamentală, fie într-o stare excitată.

Toate aceste fapte fac ca spectrele de radiații beta și gama care rezultă să fie uneori foarte complexe. Pentru a ilustra diferite tipuri de transformare, să analizăm câteva exemple.

c) Emisia de radiații gama

Nucleele care emit radiații alfa sau beta rămân, în majoritatea cazurilor, într-o stare energetică excitată. Revenirea nucleelor excitate la starea normală poartă denumirea de dezexcitare nucleară și se notează prin:



Semnul * reprezintă nucleul în stare excitată.

Emisia radiației gama lasă neschimbată poziția elementului în Sistemul Periodic. Deoarece nucleul excitat și cel normal diferă între ele doar prin starea lor energetică, ele se numesc izomere.

Există cazuri în care surplusul de energie al unui nucleu excitat nu este emis sub forma unei cuante gama, ci este transferat unui electron orbital al atomului respectiv. Acest fenomen poartă numele de conversie internă. Electronii respectivi fiind expulzați din atom, va apărea și o radiație X caracteristică.

d) Fisiunea nucleară

Este procesul prin care un nucleu se rupe (spontan sau nu) în două (sau mai multe) fragmente.

A fost observat în 1935 de Hahn și Strassmann. În prezent toată energia electrică produsă de centralele nucleare este obținută pornind de la procesul de fisiune. Enumerăm câteva dintre caracteristicile procesului de fisiune, independente de caracterul spontan sau nu al acestuia:

(I) procesul este puternic exoenergetic, eliberându-se cantități mari de energie (200 MeV/nucleu);

(II) cea mai mare parte a acestei energii se regăsește sub forma energiei cinetice a fragmentelor;

(III) fragmentele formate sunt în general beta-active și pot chiar emite neutroni (au un surplus de neutroni);

(IV) ruperea se face preponderent în două fragmente asimetrice, cu raportul maselor $2/3$.

În ceea ce privește posibilitatea energetică a fisiunii, din modelul în picătură al nucleului rezultă că procesul este avantajos din punct de vedere energetic (deci, posibil, – starea finală are energie mai joasă decât cea inițială) atunci când mărimea ZVA, numită și parametru de fisiune, este mai mare de 17. Acest lucru se realizează pentru toate elementele mai grele decât Ag.

Totuși, fisiunea spontană nu se poate observa la toate aceste nuclee, deoarece există și o energie de prag, în sensul că starea intermediară prin care trebuie să treacă nucleul are energia mai mare decât starea inițială, încă până la $Z^2/A=49$ (asemenea nuclee de fapt nici nu există în natură). Pentru nucleele cu parametrul de fisiune între 17 și 49 (cum este U-238 cu 36), procesul poate avea loc dacă i se comunică nucleului energia suplimentară, necesară pentru a trece prin starea intermediară (*fig. 5*).

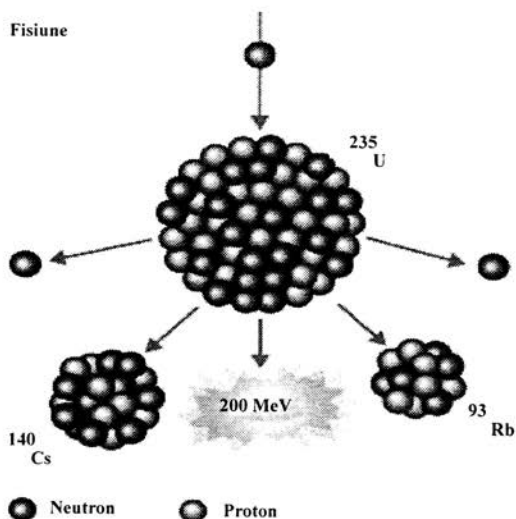


Fig. 5. Fisiunea nucleului.

Este clar că într-un asemenea proces se eliberează o cantitate foarte mare de energie (termică), ce poate fi utilizată în diferite scopuri. Singura problemă care rămâne de rezolvat este asigurarea condiției ca fiecare neutron produs într-o fisiune să producă (prin eventuala fisiune indusă de el) în medie încă cel puțin un neutron.

Într-o explozie atomică reacția în lanț se produce foarte rapid; într-un reactor nuclear, reacția în lanț se produce controlat, astfel încât energia se eliberează lent și poate fi utilizată la producția de energie.

Din procesul de fisiune nucleară rezultă diferiți radionuclizi. Ei pot apărea direct (produse de fisiune), sub forma fragmentelor respective, sau pot fi rezultatul ciocnirii inelastice a neutronilor cu nucleele combustibilului sau al altor materiale prezente în reactor (produse de activare).

Produsele de fisiune au masa atomică medie (aproximativ $2/5$ sau $3/5$ din masa combustibilului).

e) Fuziunea nucleară

Fuziunea nucleară este procesul invers fisiunii, când mai multe nuclee se unesc, formând un nucleu mai mare.

Acest proces are loc cu nuclee ușoare, pentru care este exoenergetic. Asemenea procese au loc în Soare (atomii de Hidrogen și Deuteriu se unesc formând Heliu). Procesul a fost reprodus pe Pământ în bombele cu hidrogen (termonucleare), mult mai puternice decât cele atomice cu fisiune. Procesul

este greu de produs datorită respingerii electrostatice dintre nuclee. Se încearcă construcția unor reactoare energetice de fuziune.

2.9. Proprietățile generale ale neutronilor

a) Descoperirea neutronului. Încă din anul 1920, Rutherford a prevăzut existența unui „atom” având masa egală cu unu și sarcina egală cu zero „atom”, ce ar trebui să posedă proprietatea de a pătrunde nestânjenit prin materie. Încercările făcute în laboratorul său de a pune în evidență existența acestei particule la trecerea unei descărcări electrice printr-o atmosferă de hidrogen nu au dus la vreun rezultat, între timp mai multe laboratoare din Europa au început să studieze intens reacțiile (α , ρ), singurele posibile de a fi studiate pe atunci. Bombardarea nucleelor ușoare (pentru care atracția coulombiană nu era prea mare) cu particule α a dus la dezintegrarea acestor elemente până la potasiu, inclusiv. Existau, însă, și excepții. Printre acestea Be și Li. În 1930, Bothe și Becher, în Germania, apoi doi ani mai târziu soții Curie, în Franța, au observat că aceste elemente și alte câteva bombardate cu particule emit o radiație extrem de dură cu un coeficient foarte mic de absorbție în plumb. În mod eronat, dar firesc pentru stadiul fizicii nucleare din acea vreme, s-a considerat că această radiație este de natură electromagnetice (raze γ). „Radiația γ ” era în stare să smulgă din parafină protoni de recul cu o energie neașteptat de mare, efect ce nu putea fi descris de formalismul Debye-Compton aplicat acestui fenomen. În același an, Chadwick, folosind o aparatură îmbunătățită, a observat că această radiație dă naștere și la alte nuclee de recul: Li, Be, B, C și N. Analizând o cantitate mare de date experimentale, măsurând cât mai exact cu puțință energia acestor nuclee de recul ce se obțineau cu ajutorul radiației miraculoase, Chadwick a ajuns la concluzia că toate procesele observate pot fi explicate foarte simplu, admitând că era vorba nu de fotoni γ , ci de o radiație corpusculară formată din particule neutre din punct de vedere electric sau cu o sarcină electrică neglijabilă. Toate lucrările ce tratau această temă, apărute înainte sau după emiterea ipotezei date, au confirmat în mod strălucit concluzia fizicianului englez. Această nouă particulă a primit numele de *neutron*.

b) Masa neutronului. Prima estimare a masei neutronului a fost făcută chiar de către Chadwick. În reacțiile nucleare cu participarea neutronului, atunci când se face bilanțul energetic, precizarea maselor particulelor este foarte importantă fiindcă o unitate atomică de masă are un echivalent în ener-

gie de $931 \cdot 10^6$ eV, ceea ce înseamnă că o eroare de numai $\pm 0,000003$ u corespunde unei nedeterminări în energie de $2,8 \cdot 10^3$ eV.

Prima estimare amintită s-a făcut măsurând vitezele a două nuclee de recul (N și H) și scriind legile conservării impulsului și energiei pentru cele două procese în parte.

Chadwick a obținut pentru masa neutronului 1,15 u. Spectrometrele de masă, a căror precizie a crescut pe măsura trecerii timpului, au permis determinarea mai exactă a masei neutronului. Ea este considerată astăzi a fi egală cu 1,0086654 u (Cohen, 1965).

c) Sarcina neutronului. Primele încercări de evaluare a sarcinii neutronului au fost făcute de către Dec (1932) prin măsurarea densității de ionizare a neutronului. El a stabilit că neutronul nu creează mai mult de o pereche de ioni pe o lungime de 3 m. Comparând acest rezultat cu puterea de ionizare a protonului (10^3 perechi de ioni pe cm^3), s-a putut estima că sarcina neutronului este cel puțin de 1 000 ori mai mică decât sarcina protonului. Experiențele ulterioare, ce au vizat devierea fasciculelor de neutroni termici în câmpuri electrostatice, au condus la concluzia că sarcina neutronului nu poate fi mai mare de $2 \cdot 10^{-22}e$ (King, 1960; Shull, 1967), unde e reprezintă sarcina electronului.

Prin urmare, cu o mare precizie se poate considera că sarcina neutronului este nulă. Totuși faptul că ea ar putea fi diferită de zero este important dacă ne gândim la aglomerările de materie din univers și la evoluțiile lor în timp și spațiu.

d) Spinul și momentul magnetic al neutronului. S-a stabilit că toate nucleele ce au număr impar de neutroni se supun statisticii Fermi, iar cele ce au un număr par de neutroni se supun statisticii Bose. De aici se poate trage concluzia că neutronii se supun primei statistici. Este cunoscut faptul că statistica Fermi guvernează distribuția stărilor de energie ale particulelor cu spin semiîntreg și că două particule identice ce se supun acestei statistici nu se pot afla în aceeași stare. Hughes (1951), folosind reflexia neutronilor pe oglinzi magnetice, a stabilit experimental că spinul neutronului este $1/2$.

Legat de acest spin neutronul posedă un moment magnetic ce a fost măsurat de către Alvarez și Bloch (1940). Folosind o metodă de rezonanță magnetică, ei au dedus valoarea momentului magnetic al neutronului $\mu_n = -1,935$ magnetoni Bohr. Determinări mai exacte cu o tehnică îmbunătățită (Ramsey, 1950) au dus la valoarea $\mu_n = -1,913138 \pm 0,000045$ magnetoni Bohr.

Descoperirea neutronului a impulsionat puternic cercetările de fizică nucleară. Rezultate de o importanță excepțională au fost obținute de către Fermi,

care a stabilit că atât elementele ușoare, cât și cele grele devin radioactive în urma bombardării cu neutroni. Cercetări ulterioare au dus la descoperirea fisiunii nucleelor grele în urma captării neutronilor. Studiarea proprietăților neutronilor și a interacțiilor sale cu materia constituie și astăzi un capitol important al fizicii.

e) Clasificarea neutronilor după energia lor. În funcție de energia neutronilor, interacțiunea lor cu substanța prezintă aspecte diferite. De aceea este bine să se precizeze principalele grupe de energie, acceptate astăzi în fizica neutronilor, pentru a putea înțelege principalele tipuri de interacții dintre neutroni și materie.

Neutronii lenți au energiile cuprinse între 0 și 10^5 eV. În acest domeniu energetic există mai multe subgrupe: neutroni ultrareci cu energii mai mici de 10^{-6} eV, neutroni reci ce au energia în intervalul $20^{-6} - 0,005$ eV, neutroni termici a căror energie se află între 0,005 și 0,5 eV, neutronii epitermici și de rezonanță cu o bandă energetică mai largă, cuprinsă între 0,5 și 10^5 eV.

Peste 10^5 eV se intră deja în domeniul neutronilor rapizi, iar peste 10^8 eV avem de a face cu neutroni foarte rapizi. Conform acestei clasificări vom vedea care sunt principalele tipuri de interacții dintre neutroni și nuclee sau alte particule și cvasiparticule.

2.10. Legea fundamentală a dezintegrării radioactive

Orice substanță radioactivă este caracterizată printr-o mărime numită *constantă radioactivă* sau constantă de dezintegrare λ , ce arată viteza de dezintegrare a nucleelor din care este formată substanța. Deoarece dezintegrarea radioactivă nu depinde de factori externi, putem face ipoteza că numărul de nuclee, care se dezintegrează în unitatea de timp, $-dN/dt$, este proporțional cu numărul de nuclee prezente în momentul t :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

De altfel, pe cale experimentală, s-a constatat că intensitatea radiației emise de o substanță radioactivă este proporțională cu cantitatea de substanță.

Integrând relația de mai sus și punând condiția ca la $t = 0$ (momentul inițial) numărul de nuclee să fie N_0 , se obține:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Constanta radioactivă reprezintă probabilitatea ca un nucleu să se dezintegreze în unitatea de timp. Numărul de nuclee care se dezintegrează în

intervalul de timp cuprins între t și $t + dt$ este $\lambda N dt$ și reprezintă în același timp numărul de nuclee care au trăit t secunde. Viața medie a unui nucleu este, deci, dată de relația:

$$\tau = -\frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{\lambda}$$

Deseori este avantajos să caracterizăm o substanță prin timpul de înjumătățire $T_{1/2}$, adică timpul în care se dezintegrează jumătate din numărul nucleelor; atunci, din ultima relație, se obține:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

și deci

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,6931}{\lambda}$$

Înlocuind pe λ din ultima relație în ecuația ce dă numărul nucleelor ce rămân nedezintegrate, legea fundamentală, se poate scrie:

$$N = N_0 e^{-0,6931 \frac{t}{T_{1/2}}}$$

Timpul de înjumătățire al substanțelor radioactive naturale diferă foarte mult.

Legea fundamentală a dezintegrării radioactive se verifică experimental; singura ipoteză pe care am făcut-o este aceea că λ nu depinde de factori externi, ci numai de starea internă a nucleelor. Prin urmare, sensul legii de dezintegrare este acela că fiecare nucleu al unei substanțe are aceeași probabilitate de a se dezintegra. Legea fundamentală este o lege statistică și de aceea nu va fi riguros îndeplinită, decât în cazul în care N este foarte mare. Este de așteptat, prin urmare, să se observe fluctuații în jurul unei anumite valori medii a lui N ; aceste fluctuații au fost determinate experimental și s-a constatat că se supun legilor statistice obișnuite.

În practică este totdeauna necesar să se cunoască numărul de particule pe care le emite o sursă radioactivă în unitatea de timp; acest număr este egal cu numărul de nuclee care se dezintegrează în unitatea de timp și se numește activitate:

$$A = \lambda N.$$

Înlocuind pe N cu expresia dată de legea fundamentală, se obține:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

unde $A_0 = \lambda N_0$ este activitatea la momentul inițial. Din relația de mai sus, se vede că activitatea unei anumite cantități de substanță radioactivă variază în timp după aceeași lege exponențială după care variază numărul de nuclee radioactive.

Din considerente istorice, pentru măsurarea activității s-a ales o unitate denumită „curie”, prin care s-a definit activitatea acelei cantități de radon ce se află în echilibru cu un gram de radium. Măsurătorile efectuate au arătat că în acest caz se emit $3,7 \cdot 10^{10}$ particule alfa pe secundă și de aceea în prezent unitatea „curie” se definește ca acea cantitate de substanță radioactivă în care au loc $3,7 \cdot 10^{10}$ dezintegrări pe secundă.

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ dezintegrări/s.}$$

Legea fundamentală a dezintegrării radioactive a fost dedusă în ipoteza că substanța conține un singur element radioactiv izolat. Deseori însă se întâlnesc situații în care este necesar să se cunoască modul în care se dezintegrează o substanță ce ia naștere din alta prin dezintegrare.

2.11. Spectrul electromagnetic

Clasificarea undelor electromagnetice după frecvență (sau lungime de undă) constituie spectrul electromagnetic. Spectrul electromagnetic acoperă un interval foarte larg de lungimi de undă între 10^6 cm și 10^{-12} cm. *Figura 6* reprezintă spectrul electromagnetic, în extremitatea lungimilor de undă mari putem plasa mai întâi curentul continuu (lungimea de undă $\lambda = \infty$, frecvența $\nu = 0$), apoi curentul alternativ obișnuit (cel mai lent având $\lambda = 19\,000$ km, frecvența $\nu = 16$ Hz) și undele radio (lungi, scurte și ultrascurte). Aceste unde electromagnetice sunt produse de circuite electrice oscilante, spre deosebire de cele din regiunea următoare (a undelor calorice, infraroșii, vizibile, ultraviolete) care sunt produse de generatori atomici și moleculari. De exemplu, dacă se încălzește hidrogenul molecular la temperatură ridicată, atomii din molecula de hidrogen execută mișcări armonice unul față de altul, emițând în infraroșu ($\nu = 5 \times 10^{13}$ Hz). Pentru producerea radiațiilor de lungimi de undă mai scurte este necesar ca emițătorii atomici sau moleculari să primească energii de excitație mai mari decât în cazul ciocnirilor datorate mișcării termice; aceasta se realizează de exemplu prin ciocniri cu electroni rapizi.

La extremitatea lungimilor de undă mici ale spectrului electromagnetic se află radiațiile X și radiațiile γ , care apar în dezintegrarea radioactivă și în radiații cosmice.

Undele electromagnetice, aparținând diferitor regiuni ale spectrului electromagnetic (fig. 6), au proprietăți foarte diferite. Pentru a exemplifica acest fapt, amintim că ochiul uman este sensibil numai la radiații dintr-un domeniu îngust al spectrului electromagnetic, numit din această cauză vizibil. Cu toate acestea există câteva proprietăți comune tuturor radiațiilor din spectrul electromagnetic și anume:

1. viteza de propagare în vid este aceeași ($c = 2,997925 \times 10^8$ m/s);
2. sunt formate dintr-o undă electrică și una magnetică, ce oscilează într-un plan perpendicular pe al primei.

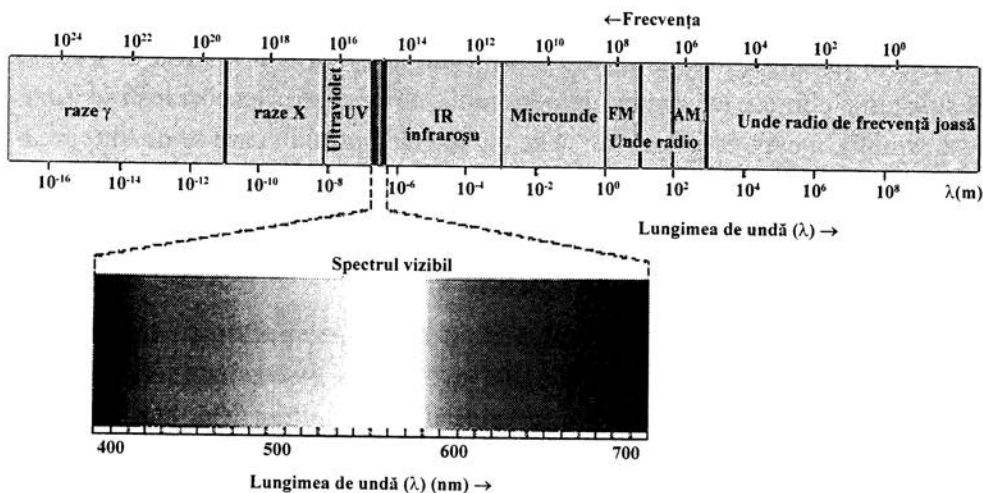


Fig. 6. Spectrul electromagnetic.

Capitolul 3.

INTERACȚIUNEA RADIAȚIILOR CU SUBSTANȚA

3.1. Noțiuni generale

În continuare se vor elucida procesele care au loc la trecerea radiațiilor prin substanță, atât pentru radiațiile ce posedă sarcină electrică (particule alfa, electroni, pozitroni, protoni, ioni grei), cât și pentru cele fără sarcină electrică (X, gama, neutroni).

La trecerea radiației prin substanță, interacțiunea are loc, de fapt, între atomii substanței și radiația care o străbate.

Aceasta interacțiune va depinde, deci, atât de proprietățile radiației, cât și de cele ale substanței. Orice proces de interacțiune poate fi interpretat ca o ciocnire. Ca măsură a capacității de interacțiune reciprocă s-a introdus o mărime, numită *secțiune eficace* (atomică), care, pentru unele cazuri particulare, se reduce aproximativ la aria secțiunii transversale, geometrice, a particulei ciocnite.

Atomul este alcătuit din electroni și nucleu, așa încât interacțiunea radiației cu atomul cuprinde interacțiunea radiației cu electronii și interacțiunea radiației cu nucleul atomic. Acest fapt trebuie reținut, deoarece există situații în care, practic, la interacțiune nu participă decât una dintre cele două componente ale atomului (electronii sau nucleul), participarea celeilalte putând fi neglijată. Deoarece interacțiunea dintre radiație și substanță este un proces reciproc, atât radiația, cât și substanța suferind modificări, sunt studiate separat efectele interacțiunii asupra radiației și asupra mediului străbătut. Aceste efecte se manifestă asupra mărimilor care caracterizează radiația și mediul.

Astfel, un fascicul de particule este caracterizat de numărul de particule care străbat o arie dată în unitatea de timp – fluxul de particule, de cantitatea de energie transportată de acest flux de particule – fluxul de energie – și de distribuția după energii a particulelor din flux – spectrul energetic. Toate, sau numai o parte din aceste mărimi, pot suferi modificări la trecerea radiației prin substanță.

Devierea unei particule din drumul ei, ca urmare a interacțiunii cu un atom, scoate particula din fascicul. Fenomenul se numește împrăștiere și are ca rezultat micșorarea fluxului de particule, a fluxului de energie și o modificare a spectrului energetic. Același efect se poate obține și prin fenomenul de absorbție, prin care particula dispare pe parcurs, ca urmare a unui act de ciocnire.

Deși prezintă aceleași efecte, cele două fenomene se deosebesc, deoarece la împrăștiere toate particulele pot fi regăsite după ciocnire, în timp ce în cazul absorbției particulele nu mai pot fi regăsite. Totodată, însă, numărul de particule din fascicul poate să și crească, ca urmare a altor procese, cum ar fi fenomenele de generare specifice particulelor de mare energie sau unele reacții nucleare cu generare de particule; în aceste cazuri există posibilitatea „împurificării” fasciculului incident cu alte tipuri de particule.

Toate aceste procese conduc la modificarea caracteristicilor inițiale ale fasciculului de particule și sunt înglobate în termenul general de atenuare (*fig. 7*).

Există, din acest punct de vedere, două tipuri de radiații: unele, care se atenuază total după trecerea printr-un strat de substanță – atenuare cu parcurs (exemplu tipic: radiațiile alfa), și altele, care nu pot fi atenuate total într-un strat de substanță cu grosime finită – atenuare exponențială (exemplu tipic: radiațiile gama). Din cauza acestor procese de atenuare, substanța străbătută de radiație poartă numele de *atenuator* sau *absorbant*.

Din punctul de vedere al substanței străbătute de radiație, interacțiunea cu radiația poate să conducă la modificări ale structurii și ale proprietăților caracteristice – fizice, chimice, biologice etc.

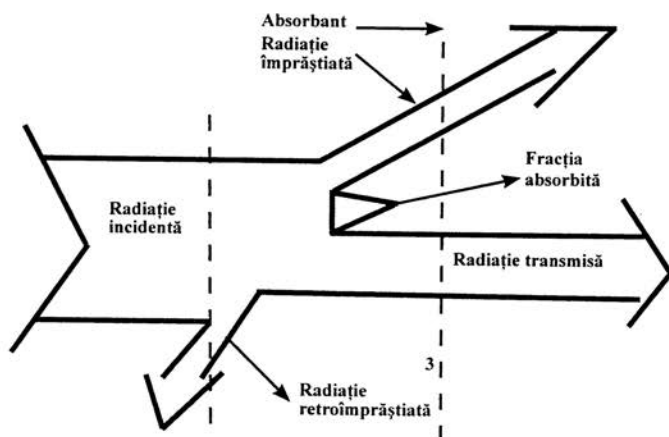


Fig.7. Schema principalelor procese ce conduc la atenuarea unui fascicul de radiații care străbate substanța.

3.2. Procesele primare de interacțiune a radiațiilor ionizante cu substanța

Aceste procese se reduc, după câte s-a văzut, la ciocniri. Din principiile generale ale fizicii se știe că în procesele de ciocnire se conservă unele mărimi ca: energia totală, impulsul total, momentul cinetic total, sarcina totală etc.

Din punctul de vedere al conservării energiei, ciocnirile se pot clasifica în ciocniri elastice și ciocniri inelastice. Prin ciocniri elastice înțelegem acele ciocniri în care nu se modifică energia internă a particulelor ce se ciocnesc; în procesul de ciocnire energia cinetică totală se conservă. În cazul ciocnirilor inelastice, energia internă se modifică, iar energia cinetică totală nu se mai conservă.

Ciocnirile care se soldează cu dispariția (absorbția) sau apariția (generarea) de particule sunt ciocniri inelastice tipice.

Atomul ciocnit de o particulă poate suferi unul din următoarele efecte:

- trecerea unui electron de pe un nivel de energie pe altul (excitare);
- scoaterea unui electron din atom (ionizare – producere de perechi de ioni);
- modificarea poziției atomului sau punerea lui în mișcare ca un întreg (deplasări);
- modificarea structurii nucleare (reacție nucleară).

Dacă particula ciocnește o moleculă, față de efectele amintite, se mai pot produce și disocieri ale moleculei respective (producere de radicali liberi).

În continuare vom analiza concret modul cum interacționează cu substanța fiecare tip de radiație în parte.

a) Particulele alfa, protonii și ionii grei

Procesele principale de interacțiune cu substanța a particulelor alfa, protonilor și ionilor grei sunt excitarea, ionizarea, deplasarea atomilor sau moleculelor ciocnite și, eventual, disocierea moleculelor (*fig. 8*). Reacțiile nucleare nu trebuie luate în considerare decât la energii mari ale particulei incidente, ele fiind procese cu prag energetic ridicat.

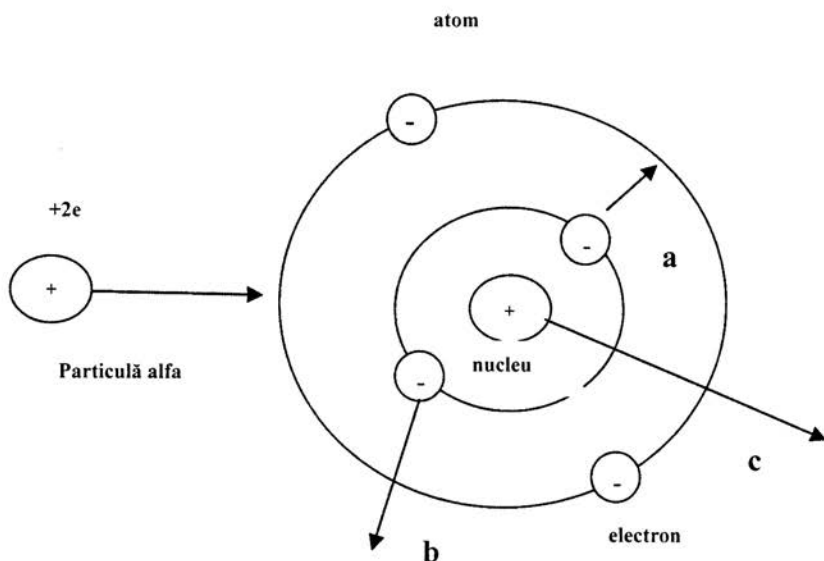


Fig.8. Schema principalelor procese de interacțiune a particulelor încărcate cu atomii unei substanțe (*a* – excitare; *b* – ionizare; *c* – deplasarea atomului).

Interacțiunile cele mai importante ale particulelor alfa, protonilor și ionilor grei rămân însă excitarea și ionizarea atomilor substanței străbătute. Prin fenomenul de ionizare se creează ioni și electroni liberi.

În procesele de excitare și ionizare a atomilor mediului particula cedează o parte din energia sa cinetică, parte ce se transformă în energie de excitare și ionizare. Ca urmare, energia cinetică a particulei incidente scade.

Energia de excitare se poate transfera fie unui foton, fie particulelor mediului, sporind energia de agitație termică a acestora.

La formarea unei perechi de ioni, particula transferă, deci, în mediu, o energie celorlalte sisteme. Dacă particula străbate o anumită distanță Δx în mediu, ea va produce în drumul său un număr de ionizări, energia sa descrescând cu ΔE . Mărimea $\Delta E / \Delta x$ se numește *pierdere de energie prin ionizare pe unitatea de parcurs*. Ea este cu atât mai mare, cu cât sarcina electrică a particulei este mai mare și cu cât viteza sa este mai mică. După ce energia cinetică a descrescut la zero, particula se oprește în mediu, captează electroni și formează un atom neutru (dacă este un proton sau o particulă alfa). Drumul mediu străbătut într-o substanță de particulele încărcate se numește *parcurs liniar*. Mărimea sa depinde de natura mediului și de sarcina și energia cinetică a particulei.

Din cauza masei mari, particulele alfa, protonii și ionii grei sunt foarte puțin împrăștiați, așa încât traiectoria lor în substanță se apropie de o dreaptă. Tot din cauza masei mari, electronii atomici nu influențează sensibil procesul de împrăștiere a particulei incidente, ci doar preiau din energia ei. Puținele acte de împrăștiere sunt determinate de interacțiunea cu nucleul atomului.

În aer, în condiții normale, o particulă alfa pierde la un act de ionizare circa 30 eV, ea producând pe mm câteva mii de perechi ion-electron. Astfel, parcursul în aer al unei particule alfa cu energia de câțiva MeV este de ordinul centimetrilor. În substanță solidă parcursul va fi de aproximativ 1 000 de ori mai scurt, adică de ordinul sutimilor de mm.

b) Particulele beta (electronii și pozitronii)

Ca și în cazul particulelor alfa, interacțiunea principală cu mediul are loc, în cazul particulelor β , prin intermediul forțelor electrostatice.

Procesele principale de interacțiune cu atomii sau moleculele sunt excitarea, ionizarea sau disocierea (moleculei), procese care au loc ca urmare a interacțiunii electron-electron.

Interacțiunea electron-nucleu nu este importantă pentru nucleu din cauza masei mici a electronului. În schimb, atât electronii atomici, cât și nucleul produc puternice deviații (împrăștieri) ale electronului incident.

Astfel, rezultă pierderi considerabile de energie și împrăștieri mari ale electronilor și pozitronilor.

Caracteristică interacțiunii electronului cu mediul este și pierderea de energie prin frânare. Ea este însoțită de emisia unui foton, ca urmare a variației vitezei electronului (atât ca mărime, dar mai ales, ca direcție) în procesul de împrăștiere, în conformitate cu legile fizicii clasice.

Radiația care ia naștere se numește *radiație de frânare*. Ea apare atunci când în câmpul nucleului ajung electronii cu viteză mare. Nucleul, fiind încărcat pozitiv (cu sarcina $+Ze$), va devia electronul de la direcția sa inițială, obligându-l să evolueze după o hiperbolă. Cu această ocazie el este frânat în câmpul nucleului și emite fotoni. Cu cât electronul trece mai aproape de nucleu, cu atât el este mai puternic frânat și energia fotonului emis este mai mare.

Există și electroni care sunt frânați până la oprire. În acest caz, energia fotonului emis este egală cu energia electronului.

Fotonii emiși de un ansamblu de electroni frânați pot avea orice energie între zero și energia maximă egală cu energia electronilor incidenți. Spectrul radiației de frânare este, prin urmare, un spectru continuu.

Radiația de frânare nu prezintă interes în cazul radiației alfa sau al ionilor grei, din cauza masei mari a acestora.

La capătul drumului său prin substanță, electronul de joasă energie este captat de un atom neutru, formând un ion negativ, sau neutralizează un ion pozitiv întâlnit în cale.

Spre deosebire de electron, pozitronul de joasă energie suferă un alt proces, numit *anihilare electron-pozitron*. În acest proces, pozitronul împreună cu un electron din mediul înconjurător se anihilează spontan, transformându-se în doi fotoni a căror energie totală este egală cu energia totală a sistemului electron-pozitron. Astfel, la capătul traiectoriei prin substanță, atât electronul, cât și pozitronul sunt absorbiți prin procesele amintite.

Datorită faptului că ionizarea specifică (pe unitatea de lungime) este mult mai slabă decât la particulele grele, electronii vor avea un parcurs maxim în substanță mult mai lung. Pentru electroni de 1 MeV, parcursul în aluminiu este de circa 1,1 mm.

c) Radiația gama

Radiațiile electromagnetice sunt constituite din corpusculi cu masa de repaus nulă, numiți fotoni. Lipsa sarcinii electrice și a masei de repaus are ca efect o slabă interacțiune a radiației cu substanța. Doar „ciocnirea” directă dintre foton și electron, nucleu sau atom va conduce la un act de interacțiune.

Astfel, radiația poate interacționa cu: (a) electronul, (b) nucleul, (c) câmpul coulombian. În aceste procese de ciocnire pot avea loc: (A) absorbția, (B) împrăștierea inelastică, (C) împrăștierea elastică a fotonului gama.

Fenomenele cele mai importante care au loc la trecerea radiației gama prin substanță sunt:

- efectul fotoelectric;
- efectul Compton;
- efectul de formare de perechi.

Efectul fotoelectric este un proces de ionizare a atomului ca urmare a interacțiunii directe dintre un foton și un electron legat din atom. Fotonul cedează întreaga energie electronului, fiind absorbit în material. Efectul poate avea loc numai dacă energia fotonului depășește un prag egal cu lucrul mecanic de extracție al electronului din atom.

Efectul Compton constă în împrăștierea fotonilor pe electroni liberi sau slab legați. Spre deosebire de efectul fotoelectric, aici fotonul nu dispare, ci este împrăștiat, având o energie mai mică decât cea a fotonului incident. Diferența de energie este preluată de electronul de recul. Direcția de mișcare și energia cinetică a electronului de recul depind atât de energia fotonului incident, cât și de unghiul sub care acesta este împrăștiat.

Efectul de formare de perechi, proces invers fenomenului de anihilare, este transformarea cuantei gama într-o pereche particulă-antiparticulă (electron-pozitron) în câmpul coulombian al altei particule.

Energia cuantei gama incidente se împarte în energiile de repaus ale electronului și pozitronului și energiile cinetice ale acestora și a particulei în câmpul căreia a avut loc transformarea; aceasta poate fi un nucleu sau, mai rar, un electron din substanță (fig. 9). Efectul are loc, deci, numai dacă energia fotonului gama incident depășește un anumit prag (în cazul formării perechii electron-pozitron energia de prag este 1,02 MeV – energia de repaus a electronului și pozitronului fiind 0,511 MeV), ce depinde de energia de repaus a particulelor și antiparticulelor generate, în acest caz fotonul gama dispare (este absorbit).

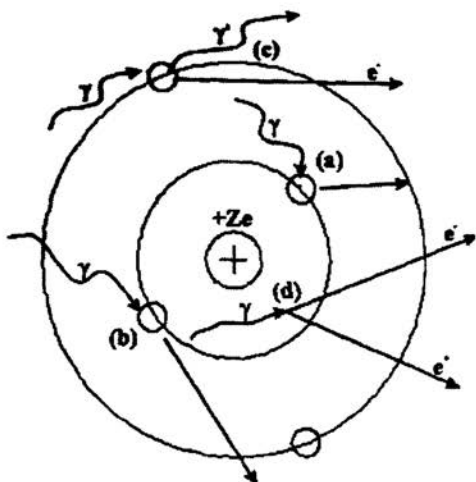


Fig. 9. Schema principalelor procese de interacțiune a radiației gama cu atomii unei substanțe (a – excitare (rezonanța), b – ionizare (efect fotoelectric), c – efect Compton, d – efect generare de perechi).

Deoarece fotonii pot exista numai cu viteza luminii, nu se poate vorbi de încetinirea lor în substanță. Ei pot fi absorbiți în substanță sau pot fi împrăștiți la unghiuri mari cu mărirea lungimii de undă.

Pentru radiațiile gama nu se definește pierderea de energie pe unitatea de lungime și nici parcursul. Datorită interacțiunii slabe a cuantelor gama cu electronii substanței, acestea sunt deosebit de penetrante, obținându-se, la trecerea prin substanță, o atenuare a fasciculului de radiații și nicidecum absorbția lui.

Pentru a caracteriza atenuarea unui fascicul de fotoni gama în substanță, se introduce coeficientul de atenuare μ , definit cu probabilitatea ca un foton gama să interacționeze pe unitatea de lungime. Atunci μdx este probabilitatea ca fotonul să interacționeze pe distanța dx .

Dacă avem I fotoni, care ajung la un moment dat la stratul de grosime dx , din fascicul vor fi scoși, pe această distanță, $\mu I dx$ fotoni. Scăderea numărului de fotoni este:

$$dI = -\mu I(x) dx.$$

Integrând relația cu condiția $I(x=0) = I_0$, obținem:

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

Mărimea:

$$\exp(-\mu x) = I/I_0$$

are semnificația probabilității ca un foton să străbată distanța x din substanță fără a fi absorbit. Atunci:

$$1 - \exp(-\mu x) = \varepsilon$$

este probabilitatea ca fotonul să fie absorbit pe distanța x , în substanță. Din relația de mai sus se poate vedea că atenuarea unui fascicul de radiații gama este exponențială.

Deoarece atenuarea fasciculului de radiații gama se datorează în principal proceselor fotoelectric, Compton și generare de perechi, vom avea:

$$\mu = \mu_F + \mu_C + \mu_P.$$

d) Neutronii

Din cauză că sunt particule neutre din punct de vedere electric, procesele de interacțiune ale neutronilor interesează numai nucleele atomilor, fapt ce conferă ciocnirii un aspect aproape clasic (mecanic).

Principalele tipuri de interacțiune cu nucleul sunt: împrăștierea elastică (n, n'), împrăștierea inelastică (n, n'), reacțiile nucleare (n, alfa), (n, proton), reacțiile de fisiune (n, f), captura radiativă (n, γ). Împrăștierea este un proces în care neutronul, în urma ciocnirii, își schimbă direcția de mișcare. Ciocnirea cu un nucleu poate avea loc fie cu, fie fără pătrunderea neutronului incident în nucleu.

Dacă ciocnirea cu nucleul are loc cu pătrunderea neutronului în nucleu, acesta din urmă trece într-o stare excitată. Dacă el se dezexcită imediat prin emisia unui neutron de aceeași energie, avem de-a face cu o împrăștiere elastică, printr-un proces de interacțiune rezonant, în al doilea caz, de ciocnire fără pătrunderea neutronului în nucleu, neutronul pierde o parte din energia sa cinetică, care este preluată de nucleul ciocnit. Acesta poate fi rupt din rețeaua cristalină din care face parte, devenind mobil și purtând denumirea de nucleu de recul. Energia preluată de nucleul de recul depinde atât de unghiul sub care este împrăștiat neutronul, cât și de raportul dintre masa neutronului și masa nucleului ciocnit. Împrăștierea inelastică are loc atunci când nucleul, după ciocnire, expulzând neutronul, rămâne într-o stare excitată.

Reacțiile nucleare cu neutroni conduc la modificarea numărului de nucleoni din nucleu, producând o dezechilibrare a structurii nucleare.

Revenirea la starea de echilibru se face prin emisia unei alte particule din nucleu. Astfel, produsul de reacție este un nucleu al unui alt element chimic. Dacă nucleul rezultat este instabil și, într-o etapă ulterioară, se dezintegrează

spontan, atunci procesul se numește activare și joacă un rol deosebit de important în aplicațiile practice ale radioactivității. Reacția de fisiune este un gen aparte de reacție nucleară, care constă în „sfărâmarea” nucleului. Fragmentele rezultate sunt nuclee, precum și o serie de alte particule ușoare, printre care și neutroni.

Captura radiativă corespunde procesului în care neutronul este capturat (absorbit) de nucleu, care nu-l mai eliberează.

Cantitatea de energie în plus a nucleului se emite ulterior sub formă de fotoni gama. De regulă, nucleul final este radioactiv.

3.3. Procesele secundare și atenuarea radiațiilor

Particulele rezultate din procesele primare de interacțiune pot, la rândul lor, să inițieze, la trecerea prin substanță, procese secundare de interacțiune care, uneori, se dezvoltă în cascadă și pot avea ca efect producerea unor modificări deosebit de pronunțate ale structurii mediului străbătut.

Procesele secundare sunt importante pentru evaluarea efectelor globale ale radiației asupra substanței.

Astfel, în procesele de interacțiune care au ca rezultat ionizarea mediului și eliberarea de electroni, aceștia din urmă pot avea o energie cinetică importantă, încât pot iniția, la rândul lor, procese secundare de excitare și ionizare.

Dacă procesele de excitare sau de ionizare au loc în păturile adânci ale învelișului electronic al atomilor, pot lua naștere, ca rezultat al tranzițiilor ce duc la reocuparea locurilor devenite vacante, radiații X caracteristice, capabile, și ele, să provoace alte efecte de ionizare în mediul respectiv.

Printre efectele secundare se numără radiația de frânare, radiația emisă la captura neutronilor, particulele emise ca urmare a reacțiilor nucleare, fragmentele de fisiune etc. Cantitatea totală de energie cedată unității de masă din mediul considerat se numește doză de radiație.

Efectul global al interacțiunii, adică atenuarea radiației, poate fi caracterizat cu ajutorul mai multor mărimi fizice, ca: pierderea specifică de energie, parcursul, distanța de înjumătățire, coeficientul de atenuare etc.

Pierderea specifică de energie sau pierderea liniară de energie este cantitatea medie de energie pierdută de particulă pe unitatea de lungime a traiectoriei din substanță și depinde atât de tipul și de energia particulei incidente, cât și de mediul străbătut.

Această mărime poate fi folosită pentru caracterizarea oricărui tip de interacțiune provocată de oricare particulă incidentă.

Parcursul, exprimat în unități de lungime, este o mărime caracteristică, dependentă atât de energia particulei respective, cât și de substanța străbătută.

În cazul particulelor încărcate grele și în cazul radiațiilor beta vorbim despre atenuare cu parcurs, particulele își pierd treptat energia, în procese de ciocniri, și rămân în substanță; în cazul radiației gama atenuarea este o atenuare exponențială.

În cazul neutronilor, atenuarea este tot exponențială, în coeficientul de atenuare fiind incluse contribuțiile tuturor fenomenelor de interacțiune primară amintite pentru neutroni.

Trecerea neutronilor prin substanță se caracterizează printr-o succesiune de ciocniri care conduc la micșorarea energiei neutronilor (fenomenul de încetinire) și la împrăștiere multiple. Procesul de micșorare a energiei are loc până în momentul în care energia neutronului ajunge în apropierea energiei medii de agitație termică a mediului străbătut. Astfel, limita minimă de energie a neutronului este dictată de temperatura mediului, neutronul ajungând la echilibru energetic (termic) cu mediul.

În această situație, neutronul, numit neutron termic, suferă nenumărate ciocniri, iar mișcarea sa seamănă cu cea a moleculelor unui gaz în echilibru termic la temperatura dată. Pentru caracterizarea situației se introduce densitatea de neutroni, care reprezintă numărul de neutroni termici existenți, în medie, în unitatea de volum.

3.4. Caracteristica generală a reacțiilor nucleare

Prin reacție nucleară se înțelege procesul de interacțiune dintre o particulă incidentă și un nucleu-țintă, proces care conduce, în general, la schimbarea proprietăților sau a naturii celor doi reactanți. Reacțiile nucleare pot fi reprezentate prin relația:



unde X este nucleul țintă, a – particula incidentă, Y – nucleul rezultat, iar b – particula emergentă. Y și b se numesc *produse de reacție*.

Desfășurarea unui asemenea proces poate fi foarte complexă.

O reacție nucleară se poate produce numai dacă sunt îndeplinite o serie de condiții. Întrucât orice interacțiune este caracterizată prin legi de conservare și interacțiunile nucleare se supun unor astfel de legi, dintre care unele sunt legi generale cunoscute, cum ar fi conservarea energiei, a impulsului, momentului cinetic și a sarcinii electrice, iar altele sunt legi speciale, cum

ar fi conservarea numărului de nucleoni sau a parității. Legile de conservare care caracterizează o reacție nucleară dau informații indirecte asupra forțelor nucleare.

a) Legea conservării energiei

Enunțul acestei legi universale, în cazul reacțiilor nucleare, este următorul: suma energiilor totale ale particulelor ce intră în reacție este egală cu suma energiilor totale ale particulelor ce rezultă din reacție.

Pentru o particulă cu masa de repaus M energia totală se scrie, conform teoriei relativității, astfel:

$$W = Mc^2 + T,$$

unde T este energia sa cinetică. Aplicând această relație în cazul unei reacții nucleare, se obține:

$$M_x c^2 + M_a c^2 + T_x + T_a = M_Y c^2 + M_b c^2 + T_Y + T_b,$$

unde M_x , M_a , M_Y , M_b reprezintă masele particulelor inițiale și respectiv rezultante din reacție. Diferența dintre energia de repaus a particulelor în stare inițială și finală se numește energie de reacție și se notează cu Q :

$$Q = [M_x + M_a - (M_Y + M_b)]c^2$$

Energia de reacție poate fi exprimată în funcție de energiile cinetice ale particulelor:

$$Q = T_Y + T_b - (T_x + T_a),$$

ea reprezentând variația totală a energiei cinetice a particulelor în urma reacției nucleare.

Prin urmare, energia de reacție Q poate fi calculată cunoscând masele particulelor participante la proces.

Dacă $Q > 0$, reacția se numește exoenergetică.

Dacă $Q < 0$, reacția se numește endoenergetică.

Într-o reacție exoenergetică, energia cinetică a particulelor în starea finală este mai mare decât energia cinetică a particulelor în starea inițială.

În reacțiile endoenergetice este necesară o energie cinetică minimă a particulelor în starea inițială pentru a produce reacția. Energia cinetică minimă a particulelor inițiale este egală cu căldura de reacție Q și se numește *energie de prag*. Energia cinetică a particulelor în starea finală în acest caz este zero. Singurul sistem de referință în care poate fi îndeplinită această condiție este sistemul centrului de masă, în care impulsul rezultat al particulelor este nul;

în orice alt sistem de referință energia cinetică a particulelor în starea inițială trebuie să fie mai mare decât energia de prag, deoarece o parte se cheltuiește pentru mișcarea sistemului de particule în ansamblu.

b) Legea conservării impulsului

Impulsul total al particulelor înainte de reacție este egal cu impulsul particulelor după reacție. Impulsul total este suma vectorială a impulsurilor particulelor.

Condiția de conservare a impulsului în reacția $x + a \rightarrow Y + b$ este:

$$P_x + P_a = P_Y + P_b$$

Deoarece, de obicei, ținta este în repaus ($p_x = 0$), conservarea impulsului se scrie:

$$P_a = P_Y + P_b$$

c) Legea conservării sarcinii electrice

Suma sarcinilor electrice ale particulelor înainte de reacție este egală cu suma sarcinilor electrice ale particulelor după reacție.

Dacă notația fiecărui nucleu-țintă și a fiecărei particule este însoțită de doi indici, cel superior A reprezentând numărul de nucleoni, iar cel inferior Z reprezentând sarcina sa, legea conservării pentru reacția mai sus amintită se scrie:

$$Z_x + Z_a = Z_Y + Z_b$$

d) Legea conservării numărului de nucleoni

Numărul de nucleoni înainte de reacție este egal cu numărul de nucleoni după reacție. Legea conservării numărului de nucleoni se va scrie:

$$A_x + A_a = A_Y + A_b$$

e) Legea conservării momentului cinetic

Într-o reacție nucleară, momentul cinetic total, format din suma vectorială a momentelor cinetice individuale ale particulelor, se conservă.

Paritatea este o proprietate cuantică legată de simetria spațială a funcției de undă asociată fiecărei particule. Legea conservării parității afirmă că paritatea funcției de undă totale, ce descrie sistemul particulelor în interacțiune, rămâne neschimbată (cu excepția unor cazuri speciale).

Varietatea reacțiilor nucleare este foarte mare și există multe moduri de a le clasifica.

După **natura particulei incidente**, deosebim următoarele tipuri de reacții nucleare:

- reacții nucleare produse de particule încărcate ușoare (protoni, deuteroni);
- reacții nucleare produse de ioni grei;
- reacții nucleare produse de neutroni;
- reacții nucleare produse de electroni;
- reacții fotonucleare.

Un alt criteriu de clasificare este natura nucleului-țintă. Din acest punct de vedere deosebim:

- reacții nucleare pe nuclee ușoare ($A < 25$);
- reacții nucleare pe nuclee medii ($25 < A < 80$);
- reacții nucleare pe nuclee grele ($A > 80$).

Energia particulei incidente determină și ea caracterul reacției nucleare. Deosebirile dintre reacțiile la energii joase și reacțiile la energii înalte sunt esențiale.

Importantă în acest caz este și natura particulei incidente, dacă aceasta este sau nu încărcată electric. Particulele încărcate își consumă o parte din energia lor pentru a se apropia suficient de mult de nucleu, pentru a intra în raza de acțiune a forțelor nucleare. Clasic, energia minimă pe care trebuie să o aibă în acest caz o astfel de particulă este valoarea energiei coulombiene de interacțiune.

Pentru nuclee grele, doar protonii cu energii suficient de mari pot ajunge în imediata vecinătate a nucleului-țintă și pot provoca reacții nucleare.

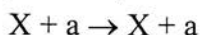
Pentru particulele încărcate domeniul energiilor joase este 0,1-100 MeV, iar cel al energiilor înalte peste 100 MeV.

Pentru neutroni energiile înalte înseamnă energii între 0,2 și 10 MeV, iar energiile joase – circa 1 keV. În plus, pentru neutroni se deosebesc și alte domenii de energii cu caracteristicile lor specifice: domeniul energiilor epitermice, de aproximativ 1 eV, și al energiilor termice, în jurul a 0,025 eV.

După tipurile particulelor, ce rezultă din reacția nucleară, avem următoarea clasificare:

1. Împrăstieri elastice

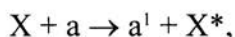
Într-un astfel de proces starea internă a țintei și a proiectilului nu se schimbă, deci ele pot fi reprezentate prin reacția:



Particula incidentă și nucleul-țintă își modifică direcția de mișcare ca urmare a ciocnirii dintre ele, energia cinetică totală conservându-se.

2. *Împrăștieri inelastice*

Într-un asemenea proces starea internă a nucleului se schimbă, nucleul absorbind o parte din energia cinetică a particulei incidente și ajungând în stare excitată. Un asemenea proces poate fi scris astfel:



unde X^* reprezintă o stare excitată a nucleului X .

3. *Reacții de transmutație*

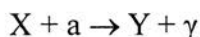
În aceste procese particula emergentă diferă de cea incidentă și poate fi scris astfel:



Nucleul rezultat se poate afla în stare fundamentală sau în stare excitată, în ultimul caz nucleul excitat se dezexcită emițând cuante γ sau electroni de conversie internă.

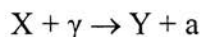
4. *Reacții de captură*

Sunt reacțiile în care particula incidentă este captată de nucleu, care emite doar radiații gama, conform procesului:



5. *Reacții de fotodezintegrare*

Reacția fotonucleară este inversă unei reacții de captură. Prin absorbția unei cuante gama de energie suficientă se produce o reacție cu emisia unei particule nucleare:



Reacțiile fotonucleare sunt reacții endoenergetice.

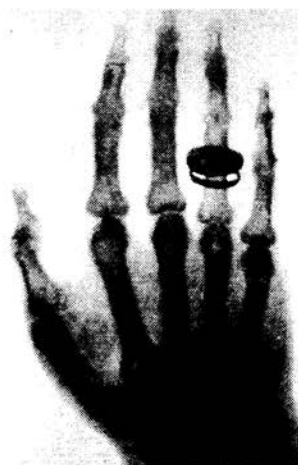
6. *Reacții de fisiune*

Într-un proces de fisiune nucleul-țintă captează particula incidentă și se rupe, de obicei, în două fragmente de mase comparabile, proces însoțit de emisia de neutroni și radiații γ . Energia degajată într-un astfel de proces este foarte mare.

Capitolul 4. RADIAȚIA ROENTGEN

4.1. Generalități

a) **Scurt istoric. Descoperirea radiațiilor Roentgen.** În ultimul deceniu al secolului XIX, o categorie importantă de cercetări fizice constituie studiul descărcărilor electrice în gaze rarefiate, studiu care a condus la descoperiri remarcabile cum ar fi radiațiile catodice (Crookes, 1879), radiațiile canal (Goldstein, 1886) și, în sfârșit, radiațiile Roentgen (1895).



Mâna cu inel

Prima imagine medicală a razelor X, realizată de Wilhelm Röntgen la 22.12.1895, ce reprezintă mâna soției sale, și prezentată profesorului L. Zehnder de la Institutul de Fizică, Universitatea din Freiburg la 01.01.1896.^{1,2}

Pe fundalul acestor preocupări ale fizicienilor din epoca sa, W.C. Röntgen, studiind proprietățile fluorescente ale radiațiilor catodice, constată întâmplător fenomenul de fluorescență a cristalelor de platinocianură de bariu aflate într-un recipient aflat la oarecare distanță de tubul catodic. Repetând experiența, constată că platinocianura de bariu depusă pe un ecran devine fluorescentă chiar dacă între tubul catodic și acesta se interpun ecrane, de diferite materiale – aceasta dispărând abia în cazul folosirii unor ecrane metalice groase.

¹ keVles, Bettyann Holtzmann (1996). *Naked to the Bone Medical Imaging in the Twentieth Century*. Camden, NJ: Rutgers University Press. pp. pp19–22. ISBN 0813523583.

² Sample, Sharron (2007-03-27). "X-Rays". *The Electromagnetic Spectrum*. NASA. <http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/xrays.html>. Retrieved on 2007-12-03.

Aceste elemente i-au permis lui Röntgen să concludă că fluorescența observată nu se datorează în niciun caz razelor catodice care au o putere de penetrație mult mai mică. Radiațiile noi numite pentru început de el „radiații X”(raze X), s-au dovedit ulterior extrem de prețioase, ca instrument al omului în cercetarea substanței, iar aplicațiile lor au pătruns în cele mai diferite domenii de activitate, de la medicină la agricultură, de la industrie la biologie, de la artă la criminalistică. De mult timp și pe bună dreptate, razele X au primit numele descoperitorului lor – radiații Roentgen, deși în literatură ele se întâlnesc încă sub ambele denumiri.



Wilhelm Conrad Röntgen (Roentgen)

(Născut la 27.03.1845 în or. Lennep, Prusia, azi parte componentă a orașului Remscheid, Renania de Nord-Westfalia;
decedat la 10.02.1923, or. München, Germania)

Fizician german. Primul laureat al Premiului Nobel pentru fizică (a.1901). Fiind singurul copil al unui negustor și producător de textile, datorită mamei sale, care provenea dintr-o veche familie olandeză, familia Röntgen a decis să se mute cu traiul în Olanda, când micuțul Wilhelm avea doar 3 ani. În copilărie și adolescență, Röntgen nu dădea semne de aptitudini ieșite din comun, dar avea o pasiune pe care, de altfel, și-a păstrat-o toată viața – de a face farse mecanice complicate, îndelung elaborate. Inginer mecanic și doctor în fizică, la 24 de ani, la Institutul Politehnic din Zürich. Asistent al profesorului Kundt. La 27 de ani docent la Universitatea din Strasbourg, iar la 34 de ani profesor la Universitatea din Giessen. Ca profesor al universității Würzburg, studiind descărcările electrice în tuburi vidate, a descoperit în a.1895 emisia unor radiații penetrante, pe care le-a numit radiații X, care după moartea sa și în pofida testamentului său au fost denumite raze Roentgen.

b) Caracteristicile generale ale radiațiilor Roentgen și natura lor.

Încă în procesul descoperirii lor, Roentgen constată o serie de caracteristici ale noilor radiații:

- sunt invizibile, adică, spre deosebire de lumină, nu impresionează ochiul omului;
- pătrund cu ușurință prin unele substanțe opace pentru lumină, de exemplu prin corpul uman, lamele metalice cu densitate mică, hârtie, lemn, sticlă, foițe subțiri metalice ș.a., dar sunt absorbite de metale cu densitatea mare (de exemplu: plumb). Puterea lor de pătrundere depinde de masa atomică și grosimea substanței prin care trec;
- produc fluorescența unor substanțe (emisie de lumină).

Razele Roentgen posedă și alte caracteristici, cum ar fi:

- impresionează placa fotografică;
- în vid ele se propagă cu viteza luminii;
- faptul că nu sunt deviate de câmpuri electrice și magnetice a fost stabilit de Roentgen ulterior.

Deși unele caracteristici sunt comune cu cele ale razelor catodice, totuși caracteristicile specifice ale noilor raze arată natura lor diferită.

Cercetări ulterioare au arătat că într-adevăr radiațiile Roentgen sunt radiații de tip electromagnetic ca și radiațiile luminoase, că au toate proprietățile ondulatorii ale acestora – se reflectă, se refractă, interferează, se difractă, pot fi polarizate etc. – proprietăți care însă se manifestă în condiții specifice, determinate de diferența ce există totuși față de radiațiile luminoase.

Radiațiile Roentgen – unde electromagnetice a căror energie este cuprinsă pe scara electromagnetică între radiațiile ultraviolete și gama, ceea ce corespunde cu lungimi de undă în intervalul $10^{-2} \text{ \AA} - 10^2 \text{ \AA}$ ($10^{-12} \text{ m} - 10^{-8} \text{ m}$)³, adică cu trei până la șapte ordine de mărime mai mici ca și în cazul radiațiilor luminoase, radiațiile Roentgen manifestă proprietăți corpusculare. Intervalele energetice ale radiațiilor Roentgen și gama se suprapun în diapazonul larg de energie. Ambele tipuri de radiație sunt radiații electromagnetice și la aceleași energii ale fotonilor sunt echivalente. Fotonii radiațiilor Roentgen au energia

³ **Ångström** – o unitate de măsură pentru lungimi, denumită așa după fizicianul suedez Anders Jonas Ångström. Simbolul ångströmului este Å. Atunci când semnul tipografic nu e disponibil, se folosește drept înlocuitor litera A. Un ångström este egal cu 100 picometri:

$$1 \text{ \AA} = 100 \text{ pm} = 10^{-1} \text{ nm} = 10^{-4} \text{ \mu m} = 10^{-7} \text{ mm} = 10^{-10} \text{ m}$$

Ångströmul nu face parte din Sistemul Internațional (SI) și deci folosirea lui nu este recomandată. Totuși, el se mai folosește curent în unele domenii. Astfel, raza unui atom, rasterul unei grile moleculare, lungimea unor legături chimice din molecule și lungimile de undă ale anumitor radiații atomice au dimensiunea de ordinul a 1 Å.

de la 100 eV până la 250 keV (respectiv $1,6 \cdot 10^{-17}$ J – $4,0 \cdot 10^{-14}$ J⁴), ceea ce corespunde frecvenței de la $2,41 \cdot 10^{16}$ Hz până la $6,04 \cdot 10^{19}$ Hz⁵ și lungimii de undă $1,24 \cdot 10^{-8}$ m – $4,97 \cdot 10^{-12}$ m⁶.



Dragomir M. Hurmuzescu

(Născut la 13.03.1865, București – decedat la 31.05.1954, București)

Fizician, inventator, profesor la Universitatea din Iași, membru al Academiei Române, este fondatorul învățământului electrotehnic din România și colaborator al soților Curie. A avut contribuții în domeniile electricității și fizicii razelor X. În 1896, împreună cu profesorul Benoist, descoperă la Paris proprietatea radiațiilor Roentgen de a descărca un corp încărcat electric – proprietate ce stă la baza xeroroentgenografiei. Reîntors în țară în 1896, D. Hurmuzescu aplică radiațiile Roentgen în medicină, situând România printre primele din lume care au folosit radiațiile Roentgen în medicină.

După lungimea de undă, radiațiile Roentgen se împart în radiații moi, cu lungimi de undă mari (~ 1 Å sau $\sim 10^{-10}$ m), energie și putere de penetrație mică (energia până la 12 keV), și dure, cu lungimi de undă mică ($\sim 5 \cdot 10^{-2}$ Å, sau $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ m) și energie, și putere de penetrație mare (energia de la 12 keV până la 250 keV), (*tabel 1*).

⁴ $1 \text{ MeV} = 10^3 \text{ keV} = 10^6 \text{ eV}$; 1 eV (electron-volt) = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

⁵ Frecvența (f , Hz) – este măsura numărului de repetări ale unui fenomen periodic în unitatea de timp. În Sistemul Internațional (SI) unitatea pentru frecvență este numită hertz și este simbolizată prin Hz, în cinstea fizicianului german Heinrich Hertz. O frecvență de 1 Hz corespunde unei perioade de repetare de o secundă (sau 1/s). Frecvența este legată cu energia prin relația $E = h \cdot f$, unde h – constanta lui Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J · s).

⁶ Lungimea de undă, $L=c/f$, unde c – viteza luminii în vid ($c = 299979250$ m/s), f – frecvența, Hz.

Caracteristicile razelor Roentgen

Energia, E		Lungimea de undă, L		Frecvența, f
eV	J	m	Å	Hz
100	$1,6 \cdot 10^{-17}$	$1,24 \cdot 10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^2$	$2,41 \cdot 10^{16}$
$12 \cdot 10^3$	$1,92 \cdot 10^{-15}$	$1,04 \cdot 10^{-10}$	$1,04 \cdot 10^0$	$2,90 \cdot 10^{18}$
$250 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^{-14}$	$4,97 \cdot 10^{-12}$	$4,97 \cdot 10^{-2}$	$6,04 \cdot 10^{19}$

c) **Mecanismul de producere a radiațiilor Roentgen. Tipuri de radiații. Spectre de radiații Roentgen.** Din modul în care apar radiațiile Roentgen, rezultă că ele sunt cauzate de bombardarea cu electroni a anodului metalic. Cu alte cuvinte, pătrunderea în metalul anodului a electronilor accelerați de câmpul electric înalt dintre catod și anod este însoțită de generarea razelor Roentgen. Cunoscând natura acestor radiații, este relativ simplu să se explice mecanismul de producere a lor.

Într-adevăr, pătrunderea electronilor în anodul metalic este însoțită de mai multe fenomene, dintre care cele mai importante sunt ciocnirile cu alți electroni ai învelișurilor nucleelor mediului, precum și de devierea lor cu câmpul nucleelor întâlnite în drum (fig. 10a).

La energii mici, ciocnirile cu electronii au un caracter elastic, neavând loc schimburi energetice între electronul „proiectil” și electronul „țintă”. Cel de-al doilea fenomen este, însă, preponderent.

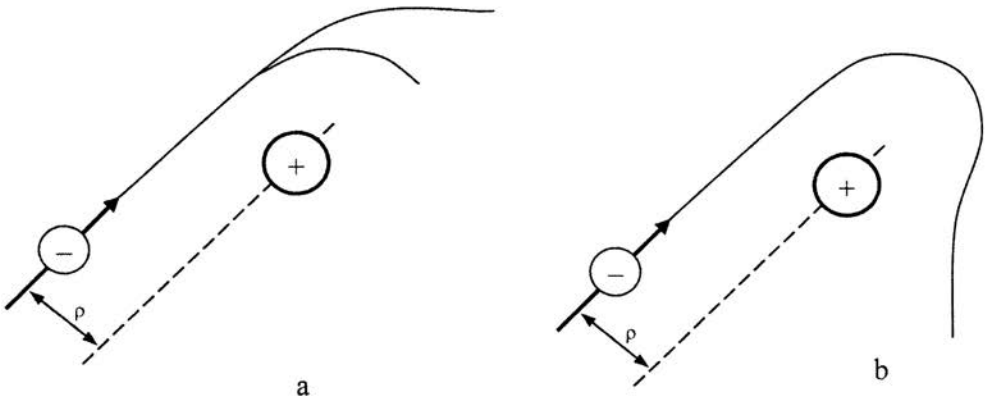


Fig. 10. Devierea electronului în câmpul nuclear.

Energia radiată provine din propria sa energie cinetică – electronul pierzând din energia sa ca și cum ar fi frânat – de unde și denumirea de radiație Roentgen de frânare, dată radiației ce apare în acest mod.

Cantitatea de energie emisă este cu atât mai mare, cu cât electronul e mai puternic deviat din drumul său – deci accelerația este mai mare (fig. 10, b).

Evident, în acest proces este antrenat și nucleul, căruia îi va crește energia de vibrație – fapt ce se reflectă macroscopic în creșterea temperaturii mediului.

Spectrul de frânare astfel emis este un spectru continuu, limitat în domeniul lungimilor de undă mici (fig. 11). Într-adevăr, după cum energia cuantelor emise diferă în raport cu parametrul de ciocnire ρ și după cum acesta poate avea orice valori, este clar că fotonul de radiație Roentgen poate avea energii cuprinse între zero și energia maximă a electronului incident, energie egală cu energia de accelerare comună tuturor electronilor la pătrunderea în anod:

$$\frac{hc}{\lambda_0} = eU.$$

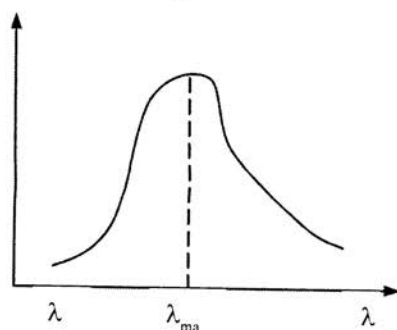


Fig. 11. Spectre continue.

Înlocuind valorile constantelor universale h , c și e (sarcina electronului), rezultă

$$\lambda_0 = \frac{12,345}{U} \cdot 10^{-7} \text{ m},$$

în care λ_0 este lungimea de undă minimă ce poate apărea într-un spectru de frânare Roentgen generat prin bombardarea anodului cu electroni accelerați cu o diferență de potențial U .

Spre exemplu, o tensiune de 10 kV poate furniza raze Roentgen cu $\lambda_0 = 1,2345 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ($\lambda_0 = 1,2345 \text{ \AA}$).

Se constată că λ_0 nu depinde de natura anodului, fapt confirmat și experimental.

Lungimea de undă λ_{\max} corespunzătoare maximului, în curba de distribuire a intensității radiațiilor în funcție de lungimea de undă (fig. 11) este față de λ_0 de 1,5 ori mai mare ($\lambda_m = 1,5 \lambda_0$) și ca și λ_0 scade cu creșterea tensiunii de accelerare a electronilor. Intensitatea radiațiilor emise în spectrul de frânare depinde de natura anodului, de tensiunea de accelerare și, evident, de intensitatea curentului și tensiunea de accelerare.

Dacă tensiunea de accelerare depășește o anumită valoare critică, valoare ce depinde de natura țintei în care se face frânarea, atunci ciocnirile cu electronii din țintă nu mai sunt elastice, putând apărea excitarea sau chiar ionizarea atomilor țintei. Electronii incidenti au energii suficient de mari pentru a proiecta electronii de pe orbite interioare ale atomilor întâlniți în cale pe orbite mai periferice. Conform postulatelor lui Bohr, locul rămas liber va fi în scurt timp ocupat de unul din electronii straturilor exterioare, proces în care se eliberează o cantitate de energie egală cu diferența energiilor caracteristice ale nivelului inițial și final, energie egală, la rândul ei, cu energia cedată de electronul incident în procesul de excitare.

Radiațiile generate în acest mod formează un spectru discret, lungimile lor de undă fiind riguros determinate.

Spectrele astfel formate sunt spectre de linii, numite și spectre caracteristice, întrucât caracterizează fiecare metal și pot fi grupate în serii ca și spectrele optice, modul de formare fiind același.

4.2. Interacțiunea radiațiilor Roentgen cu substanța

a) Atenuarea radiațiilor Roentgen. Radiațiile Roentgen sunt emise, de obicei, sub formă de fascicul – caracterizat în afară de spectrul conținut, prin intensitatea I , mărime ce dă o măsură a puterii transportate de fotonii componenți.

Prin intensitatea unui fascicul de radiații Roentgen se înțelege energia ce străbate în unitatea de timp (fluxul) o suprafață egală cu unitatea, perpendiculară pe direcția de propagare a fasciculului.

$$I = \frac{E}{St} = \frac{\Phi}{S}$$

și se măsoară în Sistemul Internațional în W/m^2 .

Dacă un fascicul paralel de radiații Roentgen se propagă în vid, intensitatea sa rămâne neschimbată, indiferent de distanța față de sursa la care este măsurată.

Dacă, însă, un astfel de fascicul se propagă printr-un mediu oarecare, intensitatea sa scade cu distanța – are loc un fenomen de atenuare.

Procesul de atenuare a radiațiilor Roentgen se datorește interacțiunii fotonilor din fascicul cu atomii mediului în care are loc propagarea și depinde atât de caracteristicile fasciculului (lungime de undă – λ , energie – ε etc.), cât și de cele ale mediului (număr atomic – Z , densitate, grosime etc.).

Într-adevăr, se constată că scăderea intensității fasciculului – dI_x , într-un material dat, este proporțională cu intensitatea I_x și grosimea de material străbătută (fig. 12):

$$-dI_x = \mu I_x d_x$$

Integrând această relație, se obține:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x},$$

în care I_0 este intensitatea fasciculului la intrarea în mediu, iar μ – coeficientul liniar de atenuare (are dimensiunea m^{-1}).

Atenuarea în aceste condiții este deci exponențială (fig. 13). Se poate calcula grosimea de material ce reduce la jumătate intensitatea unui fascicul – respectiv grosimea de înjumătățire ($d_{1/2}$) – punând condiția $I = \frac{I_0}{2}$,

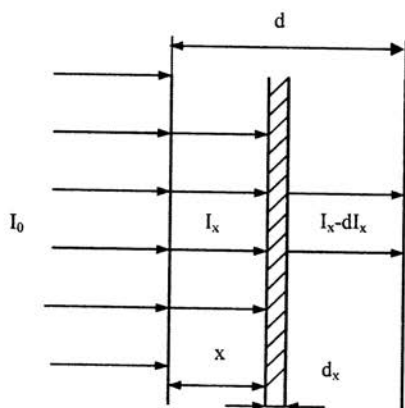


Fig. 12. Schema trecerii radiațiilor prin substanță.

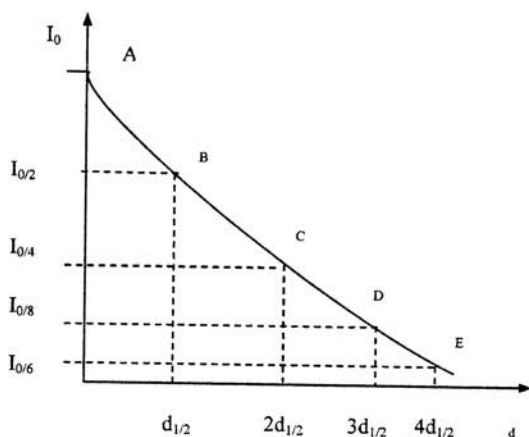


Fig. 13. Curba de atenuare a intensității radiațiilor Roentgen.

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu d_{1/2}},$$

de unde

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (6.10)$$

Se constată că ea este constantă pentru un material dat. Cunoașterea grosimii de înjumătățire permite calculul rapid al grosimii pereților de protecție biologică pentru sursele de radiații Roentgen.

b) Împrăștierea radiațiilor Roentgen. La ciocnirea unui foton Roentgen cu un electron al mediului întâlnit în drum pot avea loc următoarele fenomene:

- dacă electronul este puternic legat și fotonul are o energie insuficientă pentru a-l smulge din atom, atunci el începe să oscileze cu o frecvență egală cu cea a radiației incidente și să emită la rândul său radiații electromagnetice de aceeași frecvență, în toate direcțiile. Radiațiile emise se numesc uneori radiații Roentgen secundare;
- dacă electronul este slab legat în atom fotonul Roentgen îl poate smulge din atom, cedându-i o parte din energia sa, el însuși fiind proiectat sub un unghi diferit de zero față de direcția inițială și având o altă energie, deci o altă lungime de undă decât la incidență;
- fotonul Roentgen lovind un electron îi cedează întreaga sa energie și dispare din fascicul.

Primele două fenomene duc la schimbarea direcției fotonului și poartă numele de împrăștiere coerentă, respectiv necoerentă.

Împrăștierea necoerentă este de fapt un efect Compton și este preponderent în cazul radiațiilor Roentgen dure și al mediilor formate din elemente ușoare.

c) Absorbția radiațiilor Roentgen. Se datorește atât interacțiunii foton-electron, cât și fenomenului de formare a perechilor.

În cazul unui spectru continuu de radiații Roentgen, fotonii cu energii mai mici vor produce efect fotoelectric asupra electronilor periferici (mai slab legați în atom), iar fotonii cu energii mai mari, asupra electronilor din păturile interne (mai puternic legați).

Este important de remarcat că prin eliberarea unui electron, atomul rămâne în stare excitată, locul vacant urmând a fi ocupat printr-o tranziție electronică evident însoțită de eliberarea unui foton. Cu alte cuvinte, efectul fotoelectric este însoțit de un fenomen de fluorescență.

Evident, atenuarea fasciculului de radiații Roentgen datorită absorbției unui efect fotoelectric va fi cu atât mai mare, cu cât probabilitatea de producere

a efectului este mai mare. Această probabilitate crește cu numărul de electroni întâlniți în drum – respectiv cu Z – și cu lungimea de undă a radiației, deoarece la metale în principal numărul electronilor mai slab legați de pe straturile mai periferice este mai mare decât cel al electronilor mai puternic legați.

d) Aspecte particulare ale interacțiunii radiațiilor Roentgen cu substanța.

1. Acțiunea ionizantă.

Efectul Compton și în special efectul fotoelectric duc la ionizarea atomului implicat în procesul de interacțiune. Electronul eliberat, de asemenea, are de multe ori suficientă energie pentru a produce la rândul său alte numeroase acte de ionizare.

Astfel, în mod indirect, trecerea unui foton Roentgen prin substanță este însoțită de apariția unui mare număr de atomi ionizați, fenomen ce stă la baza unor mijloace de detecție a radiațiilor Roentgen cum ar fi camera de ionizare, contoarele de radiații etc.

2. Acțiunea chimică. Este o consecință a ionizării atomilor și moleculelor mediului. Spre deosebire de ionizarea produsă pe alte căi, în acest caz, ionizarea este uniformă (distribuția ionilor pozitivi și negativi este uniformă) și crește probabilitatea de combinare a ionilor de sarcini opuse și a radicalilor de diferite specii (H; OH).

Acțiunea chimică a radiațiilor Roentgen apare în toate stările de agregare ale substanței, manifestându-se foarte divers.

Astfel, în medii gazoase radiațiile Roentgen pot provoca reacții de descompunere, de sinteză, de oxidare, de reducere, de polimerizare etc., reprezentând de multe ori un instrument foarte util în arsenalul chimiștilor.

În medii lichide, efectul chimic al radiațiilor Roentgen îmbracă aspecte din cele mai diferite, din ele cea mai importantă este radioliza.

Așadar, cea mai importantă acțiune este cea asupra apei și a soluțiilor gazoase, acțiune importantă pentru studiul acțiunii fiziologice a radiației Roentgen asupra substanței vii.

Efectul radiațiilor asupra apei – radioliza – depinde de puritatea ei.

În anumite cazuri randamentul radiochimic poate fi influențat de prezența unor substanțe, care fie îl micșorează (au efect protector), fie îl măresc (au rol sensibilizator).

Această situație este deosebit de importantă pentru protecția chimică a organismului împotriva radiațiilor Roentgen.

În sfârșit, asupra substanțelor solide, radiațiile Roentgen au efecte ca excitarea, ionizarea, descompunerea etc. cu consecințe macroscopice privind densitatea, elasticitatea, rezistența la rupere, conductibilitatea electrică, susceptibilitatea magnetică, în special, în cazul metalelor, semiconductoarelor și sărurilor minerale.

Evident, aceste modificări reflectă efectele microscopice suferite de substanță sub influența radiațiilor.

3. Acțiunea fotochimică. Este un caz particular al acțiunii chimice, deosebit de importantă în tehnica detecției și înregistrării radiațiilor Roentgen.

Acțiunea fotochimică constă în ruperea legăturii chimice în molecula de bromură de argint, efect pe care îl produc și radiațiile luminoase, ultraviolete și cele care stau la baza procesului fotografic.

Ca și radiațiile luminoase sau ultraviolete, radiațiile Roentgen impresionează o peliculă fotografică sensibilizată cu bromură de argint, permițând obținerea unei imagini a obiectului iradiat (roentgenografie).

Data fiind puterea de pătrundere mai mare a radiațiilor Roentgen, acțiunea lor fotochimică se manifestă în toată grosimea peliculei fotografice și nu numai superficial ca în cazul radiațiilor luminoase.

Înnegrirea peliculei depinde de intensitatea radiațiilor, de lungimea de undă (duritatea lor) și de timpul de expunere.

4. Acțiunea de fluorescență. Cunoscută încă din timpul descoperirii radiațiilor Roentgen, constă în emisia de radiații vizibile sau ultraviolete de către unele substanțe supuse unui flux de radiații Roentgen. Mecanismul fenomenului de fluorescență a fost explicat la descrierea efectului fotoelectric produs de radiațiile Roentgen.

Deși intensitatea emisiei de fluorescență este mică, ea a permis vizualizarea radiațiilor Roentgen – metodă folosită și în prezent, în special, în medicină, iar în ultima vreme stă la baza detecției radiațiilor prin metode fotoelectrice cu ajutorul cristalelor de scintilație și al fotomultiplicatorilor, în special, în analiza roentgenospectrală.

5. Acțiunea biologică (efect radiobiologic). Deși în prezent nu există o teorie radiobiologică generală, capabilă să explice complet toate efectele radiațiilor Roentgen asupra substanței și dependența acestora de diferiți factori, există un material faptic bogat, care permite o serie de aplicații importante în medicină – diagnostic și terapie, în agrozootehnică etc., precum și destule concluzii pentru asigurarea unei protecții biologice corespunzătoare și a unor tratamente ale bolii de radiație.

4.3. Sisteme de generare și detecție a radiațiilor Roentgen

a) **Surse de radiații Roentgen.** De la primul tub de radiații Roentgen – tubul lui Crookes și până la betatron, sursele de radiații Roentgen au avut o evoluție continuă vizând atât creșterea intensității emise, cât și a „plurității” radiațiilor.

Astăzi există numeroase tipuri de surse Roentgen diferențiate în principal după destinația pe care o au. Ele ar putea fi clasificate astfel: surse pentru spectroscopie (analize roentgenospectrale), surse pentru radiografii medicale, surse pentru iradierii în scopuri terapeutice, pentru defectoscopie sau pentru iradierii în domeniul agrozootehnic și surse pentru analize roentgenstructurale ale substanțelor. Sursele pentru alte scopuri se apropie de unul din tipurile amintite mai sus.

Dacă primul tub Roentgen era alcătuit simplu dintr-un tub de sticlă, vidat la 10^{-2} torr, și doi electrozi între care se producea descărcarea – un tub mixt și un tub ionic sau cu catod rece – tuburile ulterioare au căpătat o serie de îmbunătățiri, cum ar fi introducerea unui anticatod sau anod principal, pe lângă vechiul anod devenit secundar (fig.14). Catodul de aluminiu capătă forma unei calote pentru a concentra fasciculul de electroni, pe anticatod, având suprafața la 45° față de axa tubului. Anticatodul este confecționat din metale greu fuzibile (wolfram, platină, tantal, molibden).

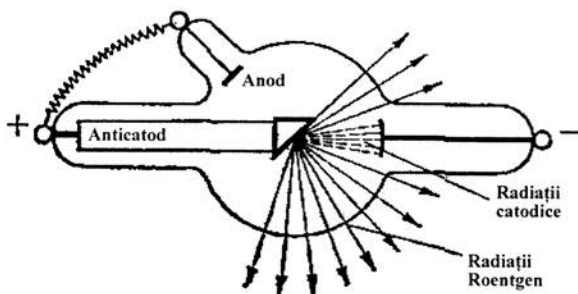


Fig. 14. Tub Crookes cu anticatod.

Tuburile ionice sunt în general vidate până la 10^{-2} – 10^{-3} torr și lucrează cu tensiuni între 10-1000 kV cu un curent până la 30 mA. Inconvenientul lor principal este imposibilitatea de a varia curentul anodic (deci intensitatea emisiei) la tensiune constantă.

Următoarea perfecționare a fost înlocuirea catodului cu un filament încălzit de la o sursă separată, tubul devenind electronic (cu catod cald). Primul tub Roentgen constituit în această variantă îi aparține lui Coolidge (fig. 15). Tuburile Roentgen actuale sunt variante ale tubului Coolidge.

Într-un tub Coolidge, presiunea aerului este de 10^{-6} – 10^{-7} torr, temperatura catodului (filamentului), în general de wolfram, atinge 2000–2200°C, iar anodul (anticatodul) este fixat pe o bară de cupru răcită cu aer, apă sau ulei (numai 1% din energia electronilor incidenți se transformă în radiații Roentgen, restul – în căldură).

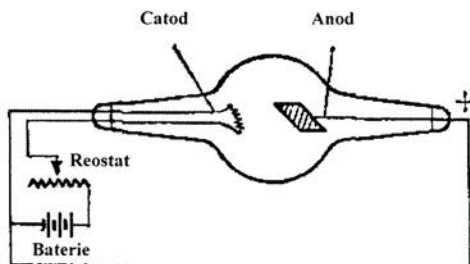


Fig. 15. Tub electronic.

În astfel de tuburi, intensitatea radiațiilor Roentgen emise depinde de temperatura filamentului și deci poate fi reglată, variind curentul de încălzire a acestuia, iar densitatea de energie emisă și duritatea radiațiilor depinde de tensiunea aplicată pe tub.

Un neajuns al tuburilor cu catod cald îl constituie volatilizarea în timp a filamentului și depunerea lui pe catod, ceea ce duce la absorbția radiațiilor emise și la apariția unor linii caracteristice ale materialului din care e confecționat catodul, modificând spectrul emis.

Tuburile de radiații Roentgen pot fi fixe (vidate și ermetic închise) (fig. 16, a) sau demontabile (se vedează înainte de a începe lucrul) (fig. 16, b), iar anodul poate fi fix sau rotitor (ori oscilant), caz în care se pot atinge curenți anodici până la 2000 mA la tensiuni de 30 kV.

Tuburile demontabile se folosesc în special pentru analize roentgenospectrale pentru a putea permite substanței de analizat să fie depusă pe anod.

Pentru obținerea radiațiilor Roentgen dure și intense, în afară de tuburile Crookes sau Coolidge de diferite variante, ca sursă intensă de electroni de mare energie, se folosește și betatronul.

Pentru unele categorii de aplicații (defectosopia pieselor subțiri, controlul grosimii straturilor subțiri, determinarea densității lichidelor care circulă prin conducte etc.) se pot obține radiații Roentgen în instalații independente, folosind ca sursă de electroni un element β -radioactiv cu o activitate convenabilă. În general, ca sursă de electroni poate fi utilizat Sr^{90} cu activități de ordinul milicuriului.

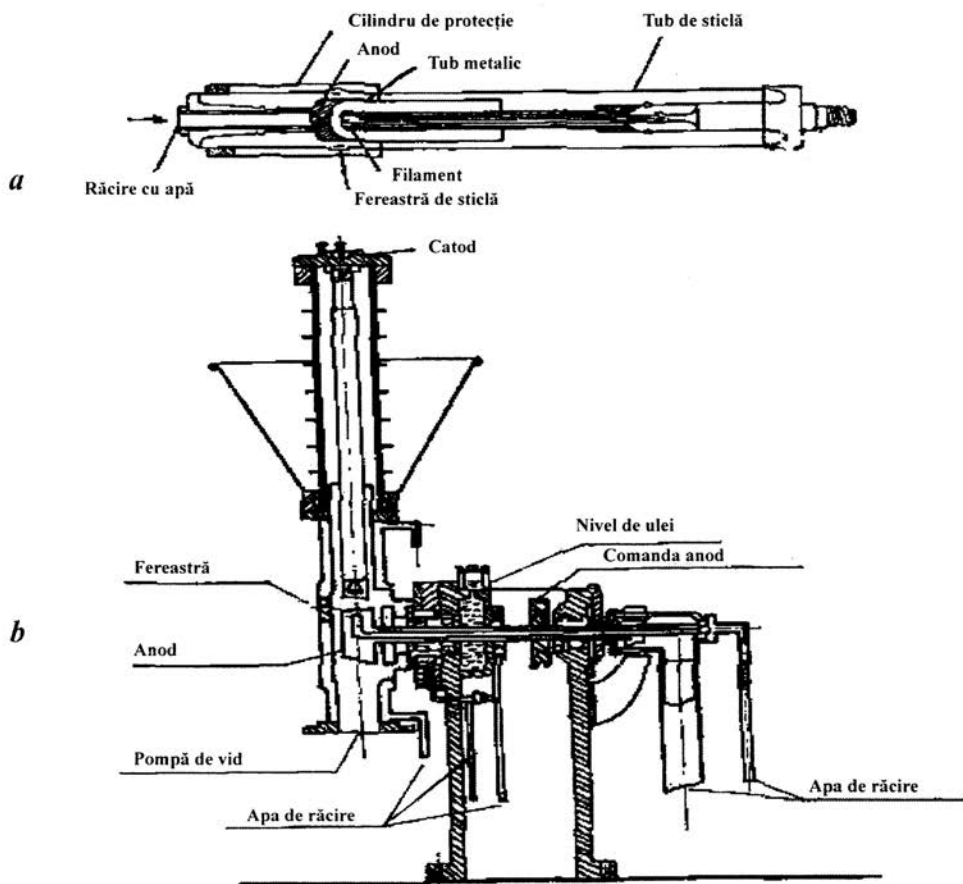


Fig. 16. Tuburi Roentgen.

În sfârșit, unele elemente γ -active dau radiații cu lungimea de undă de ordinul ångstromului și energii de ordinul kiloelectron-volților, reprezentând veritabile surse de radiații Roentgen. O altă calitate a acestor elemente γ -active reprezintă spectrul emis sub formă de linii. Printre elementele cu această proprietate menționăm Fe^{55} , Zn^{65} – izotopi radioactivi obținuți artificial.

Capitolul 5.

DOZIMETRIA ȘI RADIOMETRIA RADIAȚIILOR IONIZANTE

5.1. Sarcinile dozimetriei

Dozimetria face parte dintr-un domeniu mai larg al fizicii atomice și nucleare aplicate: detectarea și măsurarea radiațiilor ionizante. Ca disciplină, dozimetria se ocupă cu definirea și determinarea unor mărimi specifice proce-

selor de absorbție a energiei în substanța iradiată (de exemplu, doza, KERMA, expunerea și altele, derivate din acestea).

Principala sarcină a dozimetriei constă în definirea, fundamentarea, calculul și măsurarea mărimilor fizice (numite și mărimi dozimetrice), care determină efectele fizice, chimice și – în mod deosebit – cele biologice ale radiațiilor ionizante asupra substanței iradiate. Din această sarcină principală derivă o serie de sarcini secundare:

- determinarea prin calcul sau măsurare a mărimilor dozimetrice într-un punct dat;
- determinarea variației în timp și a derivatei timpului (debitul mărimilor dozimetrice);
- determinarea distribuției spațiale în vid și în substanță a mărimilor dozimetrice, atât la scară macroscopică, cât și microscopică;
- elaborarea metodelor și aparatelor pentru efectuarea măsurărilor susmenționate;
- evaluarea și îmbunătățirea preciziei metodelor, aparatelor (instrumentelor și accesoriilor), măsurărilor;
- calibrarea, standardizarea și asigurarea metrologică, etc.

În cadrul dozimetriei s-au conturat unele capitole specializate sau subdiviziuni legate de principalele domenii de aplicații:

- dozimetria radiobiologică;
- dozimetria radioprotecției;
- dozimetria chimică;
- dozimetria tehnologică;
- dozimetria mediului ambiant etc.

Pentru a-și îndeplini sarcinile, dozimetria face apel la rezultatele studiilor de fizică privind anumite interacțiuni dintre fasciculul de radiații și substanța iradiată sau privind anumite efecte ale iradierii asupra substanței, apărute în urma acestor interacțiuni. Pentru a fi utilizate în dozimetrie, interacțiunile sau efectele trebuie să prezinte, într-un grad mai înalt ori mai redus, anumite proprietăți caracteristice.

Proprietățile caracteristice avantajoase pentru dozimetrie sunt:

- Posibilitatea de aplicare la mai multe tipuri (eventual la toate tipurile) de radiații direct sau indirect ionizante.
- Posibilitatea de calibrare (ajustare) față de o metodă absolută și reproducibilitatea acestei calibrări sau posibilitatea calibrării independente prin alte metode „nedozimetrice” ori prin calcul, ceea ce conferă proprietatea de metodă absolută.

- Precizia de măsurare: în limite cât mai largi de variație a mărimilor de influență.
- Domeniul larg de măsurare a mărimilor dozimetrice și debitelor lor.
- Liniaritatea sau proporționalitatea dintre mărimea de ieșire sau de răspuns (efectul) și cea de intrare (mărimea dozimetrică de măsurat).
- Independența de spectrul de energie al radiațiilor de măsurat.
- Posibilitatea de a integra cumularea mărimii dozimetrice pe un anumit interval de timp.
- Posibilitatea de a stoca apoi indicația până la „citirea” ei (până la extragerea și prelucrarea informației).
- Posibilitatea citirii repetate a indicației (rezultatului măsurării).
- Automatizarea și salvarea rezultatelor măsurătorilor (transmiterea rezultatelor la PC pentru stocare și procesare).

5.2. Metodele dozimetrice

Niciun tip de interacțiune sau efect nu poate să corespundă într-o manieră optimă tuturor criteriilor sus-menționate. Alegerea unui anumit tip de interacțiune se face pe bază unei soluții de compromis, ținând seama de cerințele specifice unei anumite categorii de aplicații. Dozimetria a dezvoltat numeroase metode, ce asigură multiple proprietăți dintre care să se poată face o alegere judicioasă.

Metodele dozimetriei, bazate fiecare pe câte un efect al iradierii, includ următoarele:

- Dozimetria prin metoda de ionizare.
- Dozimetria prin metoda calorimetrică.
- Dozimetria prin metoda chimică.
- Dozimetria prin metoda foto.
- Dozimetria cu corp solid (dozimetria termoluminescentă (TL), dozimetria radiofotoluminescentă (RFL), dozimetria prin efecte optice în medii transparente (anorganice sau organice), dozimetria prin scintilație, dozimetria cu semiconductori etc.).

1. Dozimetria prin metoda de ionizare

Dozimetria prin metoda de ionizare se bazează pe proprietățile radiațiilor de a ioniza mediul prin care ei trec, inclusiv prin volumul detectorului (*fig. 17*).

Calculând tensiunea de ionizare, se poate depista intensitatea expunerii radioactive.

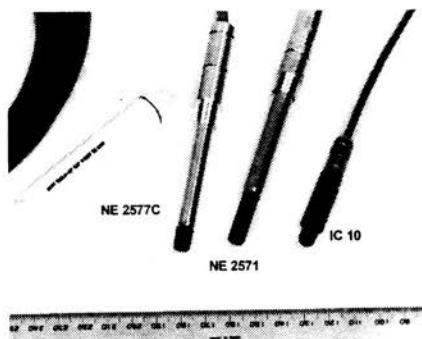


Fig. 17. Detectori de radiații ionizante.

Camerele de ionizare cu plăci paralele (fig. 18)

Sunt folosite pentru:

- radiația X de energie joasă (< 60 kV);
- electroni de orice energie, dar metoda preferabilă pentru energii < 10 MeV și esențială pentru energii < 5 MeV;
- diverse modele, din materiale și de dimensiuni diferite;
- de regulă, se vinde împreună cu un fantom adecvat din plăci.

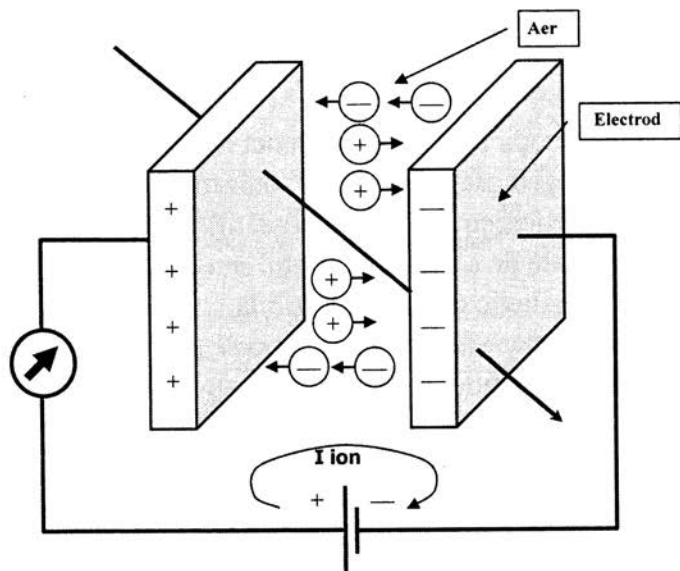


Fig. 18. Contorul tensiunii de ionizare.

Contorul Geiger Mueller



Contorul Geiger Mueller reprezintă nu un dozimetru, ci doar un numărător al evenimentelor de radiație (fig. 19). Este foarte sensibil și convenabil la utilizare, și, totodată, permite miniaturizarea. Este util pentru monitorizări de arie, monitorizarea încăperilor, monitorizare personală.

Fig. 19. Contorul Geiger Mueller.

2. Dozimetria prin metoda calorimetrică

Dozimetria prin metoda calorimetrică se bazează pe măsurarea cantității de căldură eliberată în detector la absorbția energiei radiațiilor ionizante. Toată energia de expunere, care se absoarbe de substanță, se transformă în căldură în cazul când absorbantul chimic este inert la radiații, ceea ce este proporțional intensității radiațiilor.

3. Dozimetria prin metoda chimică

Dozimetria prin metoda chimică se bazează pe măsurarea reacțiilor radiochimice, care decurg sub acțiunea radiațiilor ionizante în sisteme chimice lichide sau solide. Este cunoscută o gamă de substanțe chimice, care își schimbă culoarea în urma reacțiilor chimice, ceea ce se poate compara cu densitatea de ionizare.

4. Dozimetria prin metoda foto

Dozimetria prin metoda foto este, din punct de vedere istoric, una dintre primele metode de înregistrare a radiațiilor ionizante (descoperirea de către Becquerel, în 1896, a fenomenului radioactivității). Ea se bazează pe proprietatea radiațiilor ionizante de a influența stratul sensibil al materialelor radiofotografice (emulsia) analogic cu lumina vizibilă.

După nivelul (densitatea) de înnegrire se poate aprecia intensitatea radiațiilor ionizante în funcție de timpul de expunere. Dozimetria prin metoda foto în practică:

- depinde de existența unui program de asigurare a calității;
- cel mai des este folosită pentru demonstrarea distribuțiilor de doză;
- necesită acuratețe și dependența răspunsului la energia radiației X.

În radiologia intervențională se mai folosește și filmul radiocromat cu următoarele proprietăți:

- rezultat expres;
- nu necesită dezvoltare;
- nu e (foarte) sensibil la lumină;
- are o mai bună echivalență cu țesutul;
- este costisitor.

5. Dozimetria cu corp solid

Această metodă include dozimetria termoluminescentă (TLD), dozimetria radiofotoluminescentă (RFLD), dozimetria prin efectele optice în medii transparente (anorganice sau organice) și altele.

6. Dozimetria prin scintilație

Încă din 1908 se cunoștea că o serie de substanțe devin luminescente când pe ele cad particule alfa. Aceste substanțe emit lumină sub formă de scintilații atunci când interacționează cu particule încărcate sau cu radiații electromagnetice (raze X și gama). Astfel de substanțe sunt: cristale anorganice, cristale organice, substanțe organice lichide, substanțe plastice. Lumina emisă de aceste substanțe este transformată în electroni, care sunt multiplicați cu ajutorul unui fotomultiplicator, la ieșirea acestora obținându-se un puls, a cărui amplitudine este proporțională cu energia pierdută de particulă (sau foton) în substanța luminescentă (*fig. 20*).

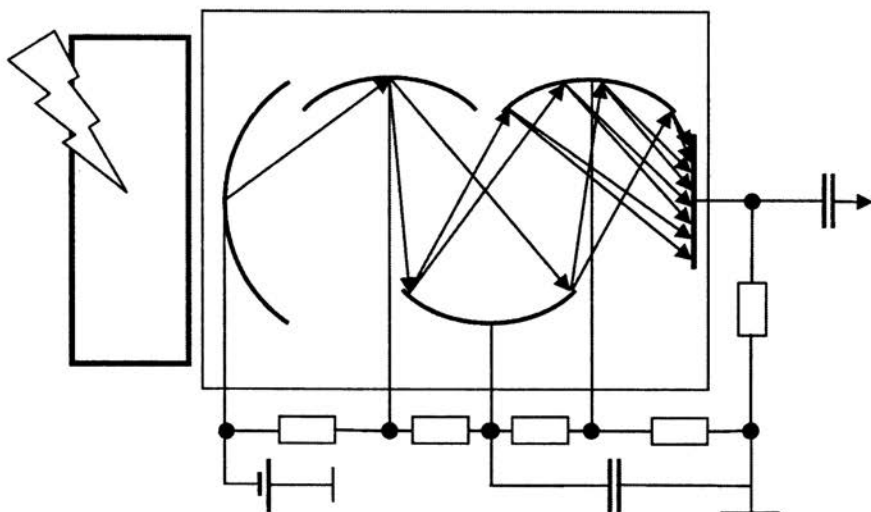


Fig.20. Dozimetria prin scintilație.

În *tabelul 2* sunt prezentate principalele metode dozimetrice, proprietățile fiecăreia și gradul în care metoda respectivă poate atinge avantajele menționate.

Proprietățile metodelor dozimetrice, apreciate comparativ

Proprietatea	Metoda dozimetrică									
	Ionizare	Calorimetrică	Chimică	TL(LiF)	RFL	Trans. optică	Scintil.	CdS	Si (jonct.)	Fotografică
Absolută	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3
Toate radiațiile	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1
Debit mic	1	3	2	1	2	3	1	1	1	1
Debit mare	2	1	1	1	1	1	3	2	3	2
Doză mică	1	3	3	2	2	3	1	1	1	1
Doză mare	2	1	1	1	1	1	3	2	3	2
Dimensiuni mici	2	3	3	1	1	1	2	1	1	1
Integrare	1	2	1	1	1	1	3	3	2	1
Stocare	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1
Recitare	3	3	3	3	1	1	3	3	3	1
Precizie	1	1	2	2	2	3	2	3	3	3

Notă:

- 1 – proprietate posedată în grad înalt;
- 2 – proprietate posedată în grad mediu;
- 3 – proprietate posedată în grad redus.

5.3. Domeniile de aplicare a metodelor pentru măsurarea dozei și a debitului dozei

În figurile de mai jos (fig. 21 și 22) sunt indicate domeniile de aplicare a unor metode pentru măsurarea dozei și a debitului dozei.

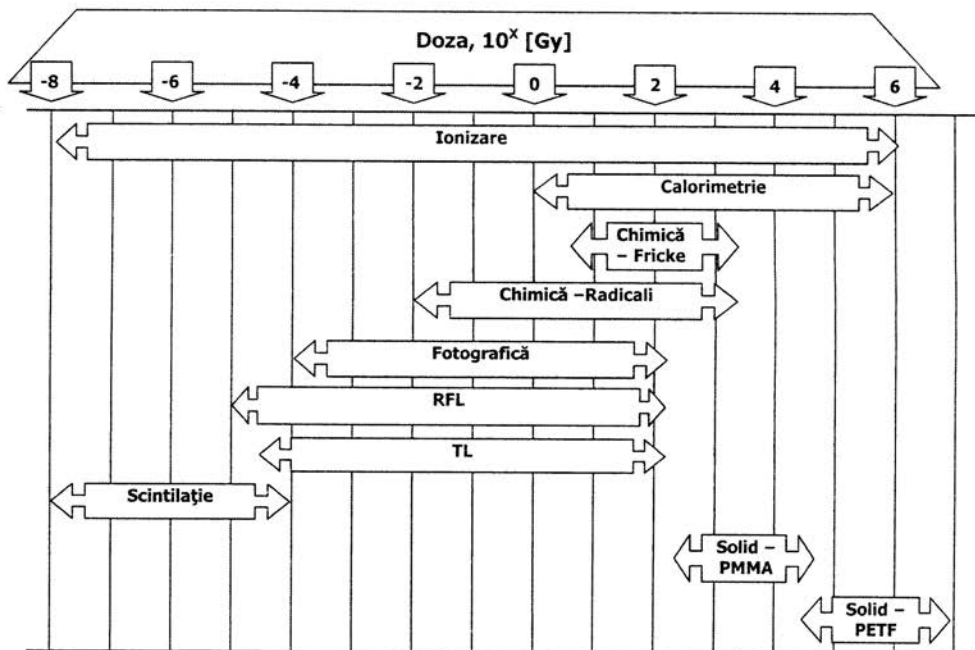


Fig. 21. Domeniul de aplicare a metodelor de măsurare a dozei.

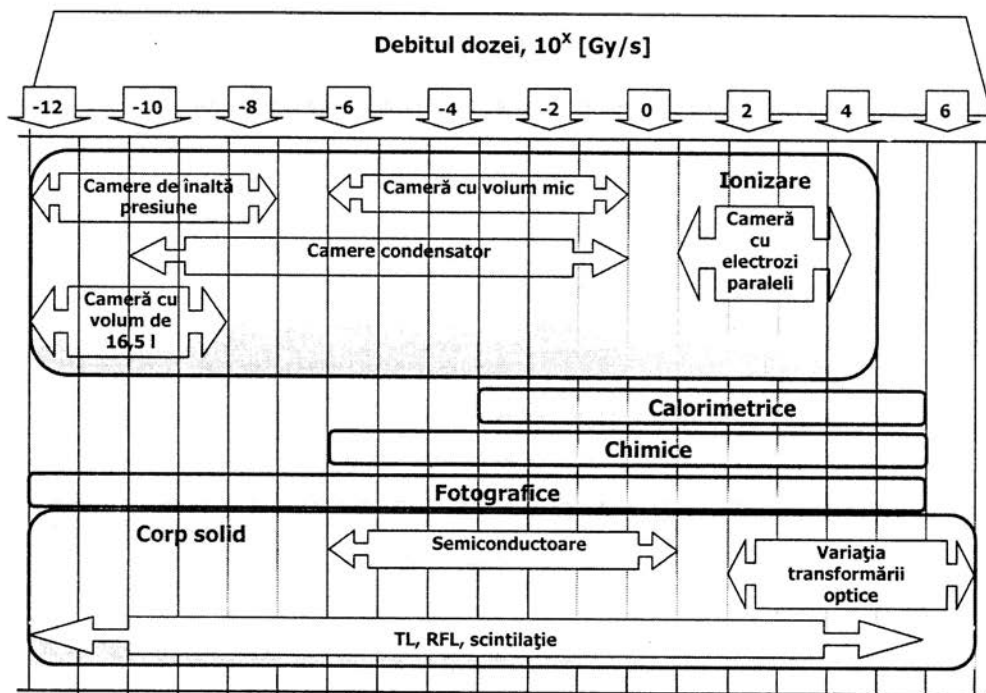


Fig. 22. Domeniul de aplicare a metodelor de măsurare a debitului dozei.

5.4. Aparate dozimetrice

Radiațiile ionizante sunt invizibile, nu au culoare, miros și alte semne, care ar indica omului despre absența sau prezența lor. De aceea, manifestarea și măsurarea acestora se efectuează cu ajutorul metodelor indirecte, în baza proprietăților lor, numite mărimi dozimetrice.

Aparatele destinate măsurării mărimilor dozimetrice se numesc, printr-un termen generic – *dozimetre*, chiar dacă ele măsoară alte mărimi dozimetrice precum și debitele lor. Dozimetrul este compus din:

- unu sau mai multe tipuri de detectori de radiații ionizante;
- o aparatură de măsurare asociată;
- o serie de accesorii.

Detectorul de radiații reprezintă un traductor ce transformă mărimea dozimetrică de intrare într-o mărime de răspuns. Detectorul constituie partea principală și specific dozimetrică a aparatului. El materializează efectele sau interacțiunile pe care se bazează, în primul rând, procesul de măsurare. Un caz particular de traductor dozimetric este sonda dozimetrică, destinată măsurării dozei în interiorul unui mediu iradiat (*tabelul 3*). Detectoarele de radiații măsoară mărimea de răspuns a radiațiilor ionizante în baza efectelor(proprietăților) care le produc acestea la interacțiunea cu substanța.

Efectele pe care le produc radiațiile ionizante la interacțiunea cu substanța:

- ionizarea mediului prin care ele trec;
- încălzirea substanței prin absorbția energiei radiațiilor ionizante de către substanță;
- desfășurarea reacțiilor chimice sub acțiunea radiațiilor ionizante;
- schimbarea proprietăților fizice ale semiconductoarelor sub acțiunea radiațiilor ionizante.

În funcție de modul în care este folosită proprietatea radiațiilor ionizante pentru a obține o anumită informație, detectoarele sunt de două feluri:

Passive – în detectoarele pasive sarcinile electrice se combină în substanță, conducând în felul acesta la disocierea unor molecule. Efectele proceselor de disociere se înmagazinează și, după o prelucrare ulterioară expunerii la radiații, se extrag informațiile necesare (detectoarele chimice și fotografice).

Active – în detectoarele active informația este prelucrată de la detector de către o instalație auxiliară, care o măsoară direct sau mai întâi o prelucrează și după aceea se măsoară mărimea de răspuns. Informația poate fi preluată direct sau indirect de la detector sub formă de curent de ionizare sau sub

formă de puls (detectoarele cu scintilație, detectoarele cu semiconductoare, detectoarele bazate pe colectarea ionilor în gaze).

Tabelul 3

**Caracteristicile principalelor metode dozimetrice
bazate pe folosirea sondei**

Metoda dozimetrică	Materi- alul de probă	Înveli- șul	Mărimea de răs- puns	Măsura- rea mă- rimii de răspuns	Mărimea măsurată
Ionizare	Gazul din camera de ionizare	Peretele camerei de ionizare	Sarcina electrică, curent, tensiune	Electrometrie	Doza în gazul din cameră
Calorimetrică	Absorbantul din calorimetru	Cămașa calorimetru-ului	Cantitatea de căldură	Termometrie (sau altele)	Doza în corpul activ termic
Chimică	Soluție (apoasă)	Vas de iradiere	Concentrația produselor de reacție	Titrare prin spectrofotometrie	Doza în soluție sau în proba de calibrare
Fotografică	Film radiosensibil	Filtre (sau fără)	Densitatea optică de înnegrire	Densitometrie optică	Doza absorbită în materialul probei din dozimetrul folosit pentru calibrare
Termoluminescentă	Lumino-for dopat	Capsulă (sau fără)	Luminescență	Fotometrie	
Radio-fotoluminescentă	Sticlă fosfatică dopată	Capsulă (sau fără)	Fluorescență (excitată în UV)	Fotometrie	

Aparatura de măsurare asociată efectuează lanțul de transformări pentru realizarea măsurării valorii răspunsului. Ea furnizează, în final, o valoare numerică afișată pe un instrument indicator, analogic sau digital, numită indicație (directă). Dacă instrumentul este gradat în valori convenționale sau relative, indicația se numește *convențională*.

Pentru determinarea rezultatului măsurătorii asupra indicației directe, trebuie efectuate o serie de operații, printre care (fig.23):

1. se aplică o serie de factori de corecție, pentru eliminarea sau reducerea erorilor sistematice;
2. se aplică factorul de calibrare, în urma căruia indicația directă, exprimată în termenii valorii răspunsului, se transformă la măsurare în termenii și unitățile unei mărimi dozimetrice;
3. se efectuează calculul erorilor și incertitudinii de măsurare.

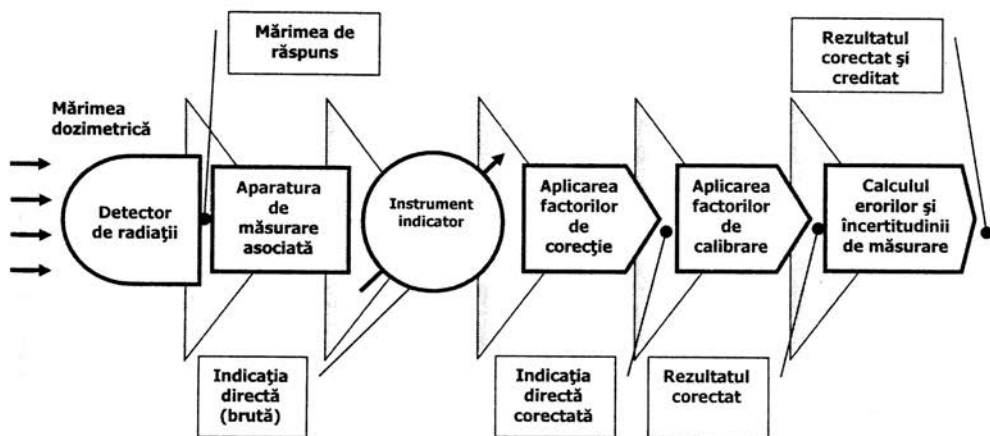


Fig. 23. Schema-bloc de principiu a unui sistem dozimetric.

Operația de calibrare este de primă importanță în dozimetrie. Prin calibrare se înțelege determinarea relației dintre valoarea mărimii de răspuns și valoarea mărimii dozimetrice de măsurat, relație exprimată prin factorul de calibrare.

1. Dozimetria absolută și relativă

Metoda dozimetrică este **absolută** atunci, când calibrarea se face prin calcul sau cu ajutorul unor metode experimentale independente, care nu implică folosirea unui detector de radiații.

Metoda dozimetrică este **relativă** în cazul, când calibrarea se face cu ajutorul unui aparat dozimetric cu calități metrologice superioare, denumit standard sau de referință.

a) **Dozimetria absolută** este o tehnică prin care se oferă informații directe privind doza absorbită în unități de doză. Operația de determinare dozimetrică absolută se mai numește și calibrare. Toate măsurătorile în continuare sunt comparate apoi cu această valoare cunoscută a dozei, în condiții de referință.

Dozimetria absolută este necesară pentru fiecare calitate de radiație în parte, determinarea dozei absolute (în Gy) se face într-un punct de referință din fantom, necesită o geometrie bine definită (de exemplu la un accelerator linear) și se aplică protocoale (coduri de practică).

b) Dozimetria relativă. În general, în dozimetria relativă nu sunt necesari coeficienți de conversie sau factori de corecție, întrucât aici are loc doar o comparare a „citirilor” a două dozimetre, unul dintre ele fiind în condiții de referință.

Dozimetria relativă stabilește relația dintre doza în condiții de nereferință și doza în condiții de referință. De obicei, sunt necesare minimum două tipuri de măsurători: una, în condițiile în care doza va fi determinată, și una, în condițiile în care doza este cunoscută.

Exemple de dozimetrie relativă:

- caracterizarea unui fascicul de radiație: doza procentuală în profunzime, rapoartele dozei în țesut și la maximum de absorbție sau altele;
- determinarea factorilor care afectează debitul: câmpul de radiație, dimensiunile aplicatorului, filtrul, factorii specifici pacientului.

Aparatele dozimetrice, în funcție de performanțele și modul lor de utilizare, pot fi:

- aparate standard sau de referință;
- aparate de lucru de uz curent;
- aparate de lucru de teren;
- aparate de lucru de laborator.

Pentru alegerea unui anumit tip de detector trebuie să se ia în considerare o serie de factori:

- natura particulelor (undelor electromagnetice) detectate – tipul radiațiilor ionizante;
- intensitatea fluxului de particule (undelor electromagnetice) – intensitatea radiațiilor ionizante;
- natura preparatelor sau a surselor de radiații (deschise, închise);
- energia particulelor (undelor electromagnetice);
- starea de agregare a surselor de radiație ionizantă;
- geometria surselor de radiație ionizantă;
- condițiile în care se efectuează detecția (în laborator, pe teren etc.);
- complexitatea aparatajului (instrumentelor) electronic necesar.

Majoritatea metodelor dozimetrice sunt într-un fel sau altul experimentale și utilizate în scopul verificării radioprotecției față de radiațiile ionizante,

dar numai o parte dintre aceste metode au promovat stadiul de utilizare, deoarece sistemele dozimetrice trebuie să satisfacă unele **cerințe specifice**:

- distincția dintre supravegherea personalului, dozimetria individuală, dozimetria generală, dozimetria mediului ambiant sau dozimetria ambientală;
- măsurările contaminării (externe și interne) a persoanelor, a suprafețelor, a mediului ambiant;
- cerințe tehnice: se referă la domeniul de măsurare, sensibilitate, liniaritate, dependență energetică, dependență de direcția de incidență a fasciculului, dependență de mărimea de influență a mediului (temperatură, umiditate, lumină, vibrație etc.);
- cerințe administrative: posibilitatea de identificare ușoară și clară a purtătorului, dimensiunile și masa reduse și adaptate modului de utilizare, alimentarea, independența de rețea, lectura rapidă, costul redus, posibilitatea de refolosire;
- cerințe juridice: posibilitățile folosirii măsurătorilor dozimetrice în cazuri de litigii civile sau anchete penale ce depind de legislația în vigoare în fiecare caz aparte.

2. Clasificarea aparatelor pentru supraveghere radiologică

În denumirea generală „supraveghere radiologică” intră patru feluri de control al efectuării oricărei activități radiologice:

- control dozimetric;
- control radiometric;
- control dozimetric individual;
- măsurători spectrometrice.

Toate aparatele de supraveghere radiologică pot fi divizate în grupe:

1. Aparat dozimetric destinate măsurării debitului de doză (nivelelor de iradiere sau expunere).

2. Aparat indicatoare – semnalizatoare – aparate simple pentru detectarea radiațiilor ionizante sau pentru semnalizarea despre nivelul de expunere instalat.

3. Aparat radiometrice – destinate măsurării contaminării (externe și interne) a persoanelor, a suprafețelor, a mediului ambiant și, totodată, activitatea lor specifică.

4. Dozimetre individuale – mijloace și aparate portative destinate măsurării dozei recepționate de o persoană anumită la efectuarea practicii specifice în perioada stabilită de activitate și de timp.

5. Instalații spectrometrice – permit stabilirea conținutului spectrului de radionuclizi în obiectul contaminat radioactiv.

5.5. Dispozitive cu corp solid pentru detectarea și măsurarea radiațiilor ionizante

Ionizarea este procesul de interacțiune principal al radiațiilor nucleare cu materia. Ionizarea substanței este directă în cazul particulelor încărcate electric și indirectă în cazul radiațiilor gama și neutronilor. Radiațiile gama formează fotoelectroni, electroni Compton și perechi de electroni care produc ionizări în substanța străbătută. În cazul neutronilor rapizi, protonii de recul rezultați în urma ciocnirilor elastice produc ionizarea substanței, iar neutronii termici produc radiații gama și particule încărcate prin reacții (n, α) și (n, p).

În solide producerea purtătorilor de sarcină liberi prin interacțiunea particulelor ionizante cu electronii periferici este un proces analog cu ionizarea gazelor. Există, însă, două deosebiri importante în această privință între gaze și solide:

- în gaze se produc electroni liberi și ioni încărcăți pozitiv, în timp ce în solide se produc perechi electron-gol;
- energia necesară producerii unei perechi electron-gol în solide este mai mică decât energia necesară producerii perechii electron-ion în gaze.

Aceasta duce la fluctuații statistice mai mici în numărul purtătorilor produși și deci la măsurători potențial mai precise ale energiei particulei incidente. De exemplu: energia medie necesară producerii unei perechi electron-gol în siliciu este $3,50 \pm 0,07$ eV, iar în germaniu $2,94 \pm 0,15$ eV față de ≈ 30 eV în gaze. Măsurători făcute pentru radiații gama, electroni, protoni, particule alfa, ioni grei și fragmente de fisiune au arătat că ϵ nu depinde de energia și tipul particulei. Valorile măsurate concordă cu cele calculate de către Shockley.

O particulă de 5 MeV stopată în siliciu produce $1,43 \times 10^6$ perechi electron-gol cu o fluctuație statistică (în cazul distribuției Gaussiene) de $\pm 1,2 \times 10^3$, adică 0,08%. Pentru camera de ionizare cu gaz fluctuația statistică constituie în acest caz 0,23%, iar pentru detectoare cu scintilație – 0,8%.

Deși în practică zgomotele detectorului și ale aparaturii electronice asociate, cât și colectarea de sarcină inefficientă fac ca rezoluția teoretică să nu fie realizată, performanțele practice ale detectoarelor cu semiconductoare sunt superioare tuturor celorlalte dispozitive bazate pe ionizare.

Atenuarea fasciculelor de radiații este de două tipuri: atenuare exponențială caracterizată prin coeficient de atenuare și atenuare cu parcurs, caracterizată prin parcursul respectiv. Atenuarea exponențială se bazează pe mecanisme monoact (particulele sunt scoase din fascicul printr-un singur act de interacțiune), pe când atenuarea cu parcurs se bazează pe un mecanism

continuu și în porțiuni mici al pierderilor de energie. O situație intermediară constituie atenuarea fasciculelor de electroni.

1. Dozimetre luminescente

Detectarea și măsurarea radiațiilor ionizante cu dispozitive bazate pe proprietățile corpului solid reprezintă în prezent ramura cea mai modernă a dozimetriei și se află într-un progres continuu și rapid. Cunoașterea cu acuratețe a dozelor de radiații este necesară în toate domeniile, atât în cele legate de marile proiecte nucleare (reactori, acceleratori, tehnici militare), cât și în cele industriale (defectoscopia X, γ), medicale (diagnostic, terapie) sau de radioprotecție.

Până nu demult, tehnicile de detecție și de măsurare a radiațiilor s-au limitat la două fenomene: ionizare în cavități (camerele de ionizare) și înnegrirea peliculei fotografice (filme dozimetrice). În ultimul timp s-au făcut eforturi considerabile pentru găsirea unor noi sisteme dozimetrice, calitativ superioare celor existente. Dintre aceste sisteme dozimetrice, cele mai multe au la bază fenomenele de luminescență a solidului.

Superioritatea calitativă a acestor dozimetre (dozimetre luminescente, LD-luminescence dosemeter) este ilustrată în *tabelul 4*), care descrie atât avantajele, cât și dezavantajele lor, în comparație cu cele ale camerelor de ionizare și ale filmelor dozimetrice. Calitățile care fac preferabilă utilizarea dozimetrelor luminescente sunt precizia, domeniul larg de măsurare și independența de energia, direcția și intensitatea radiațiilor.

Tabelul 4

Avantajele și dezavantajele diferitor tipuri de sisteme dozimetrice

Dozimetru	Avantaje	Dezavantaje
Camera de ionizare	Sensibilitate Independență de energie și direcția radiațiilor Posibilitatea folosirii multiple	Rezistență mecanică Sensibilitate la umezeală Domeniu limitat de măsurare
Filmul dozimetric	Sensibilitate Selectivitate Ieftin	Imprecis Prelucrare laborioasă a informației Dependență de energia și direcția radiațiilor Termen scurt de păstrare Fading Domeniu limitat de măsurare O singură utilizare

Dozimetrul fotoluminescent	Dimensiuni mici Reproductibilitate Precizie Domeniu larg de măsurare Independență de direcția și intensitatea radiației Posibilitatea folosirii repetate Permite repetarea informației Păstrare îndelungată	Dependență de energia radiației Sensibilitate la murdărire superficială Reacționează identic la diferite radiații Răspuns lent Scump
Dozimetrul termoluminescent	O largă posibilitate de alegere a materialului Dimensiuni mici Precizie Reproductibilitate Domeniu foarte larg de măsurare a dozelor Independență de energia, direcția și intensitatea radiațiilor Posibilitatea folosirii repetate Timp îndelungat de păstrare	Sensibilitate la temperatură Permite o singură informație Scump

Clasificarea sistemelor dozimetrice luminescente

Sistemele dozimetrice luminescente folosite în practică pot fi clasificate după tipul de centru luminescent indus de radiația nucleară și după efectul optic utilizat ca parametru de măsurare a dozei. Această clasificare este rezumată în *tabelul 5*.

Tabelul 5

Principalele tipuri de sisteme dozimetrice bazate pe luminescența solidului

Tipuri de centre induse de radiația nucleară	Procedeele de măsurare	Parametrul măsurat	Materiale folosite, exemple	Domeniul de doză măsurat, (Gy)
Centre stabile la măsurarea dozei	Iluminarea cu lumină ultravioletă (U.V.) și vizibilă	Colorația	Sticle Materiale plastice	$10 - 10^4$ $10^2 - 10^7$
		Radiofotoluminescența	Sticle	$5 \times 10^{-5} - 10^3$
		Degradarea luminescenței	Antracenu etc.	$10^4 - 5 \times 10^7$

Centre distruse prin măsurarea dozei	Încălzire	Termoluminescența	CaSO ₄ :Mn CaF ₂ :Mn LiF, Al ₂ O ₃	10 ⁻³ – 10 ³ 10 ⁻⁵ – 3 · 10 ³ 10 ⁻³ – 10 ³
	Iradierea cu radiații infraroșii (I.R.)	Luminescența stimulată cu radiații infraroșii	SrS:Eu,Sm KCl:Ag NaCl:Ag	5 × 10 ⁻⁵ – 10

Când substanța folosită ca dozimetru luminescent este iradiată, de exemplu, cu radiații X, se produc electroni liberi și goluri libere. Aceștia hoinăresc în solid până când sunt captați în locurile unde există o perturbare a câmpului electronic datorată unui atom străin, unui atom interstițial, unei „vacanțe” sau altei imperfecțiuni în structura solidului. Noul centru format poate absorbi lumină în regiunea spectrală transparentă în mod obișnuit. Un exemplu de astfel de centru îl constituie centrul F, numit și centru de culoare și care poate afecta proprietățile fluorescente ale solidului.

Dacă electronul este strâns legat la impuritate sau defect, centrul este stabil și nu se distruge prin procedeul de măsurare a dozei (iluminarea cu U.V. sau lumină vizibilă), specific dozimetriei care folosește absorbție optică; în acest caz citirea poate fi repetată.

Dacă legătura este mai slabă, electronul se poate elibera ușor din capcană prin procedeul de măsurare (absorbție de energie termică a radiațiilor IR) și astfel centrul este distrus. În acest caz citirea dozimetrului nu poate fi repetată.

Electronul eliberat din capcană va contribui la conductibilitatea electrică a cristalului până când se recombina cu un gol la un alt centru și are loc emisia luminescentă.

2. Dozimetre cu centre stabile în procedura de măsurare a dozei

Din clasa dozimetrelor, la care radiația induce centre stabile în procedura de măsurare a dozei, fac parte dozimetrele ce folosesc efectul colorării solidului ca urmare a iradierii, dozimetrele radiofotoluminescente și cele care se bazează pe fenomenul de degradare a luminescenței.

3. Dozimetrele bazate pe efectul de colorare a solidului

Multe substanțe își schimbă culoarea prin iradiere cu doze mari. Pentru dozimetrie, cantitatea măsurată este modificarea în densitate optică la o lungime de undă convenabilă. În acest scop se folosește un spectrofotometru sau un densitometru. Modificarea densității optice este proporțională cu numă-

rul de noi centre formate, care la rândul lor sunt proporționale cu numărul electronilor liberi produși prin iradiere, în consecință această modificare fiind proporțională cu doza absorbită în solid.

Materialele folosite se împart în două clase principale: sticle și plastice transparente.

Primele sticle folosite ca dozimetru colorat au fost cele fosfatoase activate cu Ag (Schulman, Klick, Rabin), cu un domeniu de măsurare de $5 \times 10^1 - 10^4$ (Gy). Dozimetrele reprezentau plăci de sticlă cu grosimea de 3 mm. Aceste dozimetre au două caracteristici nedorite: fading (pierdere) de colorație mare și o largă dependență a răspunsului de energia cuantei X. Neajunsurile menționate pot fi remediate printr-o tratare termică corespunzătoare (130°C timp de 10 minute) și, respectiv, prin folosirea scuturilor metalice compensatoare.

Mai târziu au fost obținute sticle cu o stabilitate mai mare a culorii sau capabile de a fi folosite la doze foarte mari de radiații. Astfel de dozimetre sunt sticlele Co-borosilicat F-0621 (Kreidl și Blair) cu fading foarte mic și răspuns liniar între $10-10^4$ Gy având un număr atomic efectiv mic (14), sticlele Bi-Pb-borat conținând As_2O_3 cu fading neglijabil și cu domeniu de măsură 10^3-10^7 Gy, dar Z_{eff} este mare. Aceste dozimetre au o precizie mare (2%) și sunt ușor de fabricat. Principalul lor dezavantaj constă în lipsa de sensibilitate (reacționează numai la doze mari de iradiere).

Day și Stein au fost primii care au sugerat folosirea modificărilor optice în materialele plastice pentru dozimetrie. Plasticele colorate sunt utilizabile în aceleași domenii de doză ca și sticlele, în timp ce plasticele transparente (clare) prin absorbția U.V. pot fi folosite la nivele de doze mult mai mari. Astfel de dozimetre sunt: melamina (10^2-10^5 Gy), polimetilmetacrilatul (Perspex, PMMA) cu domeniul de doze cuprins între 10^2-10^4 Gy, policlorura de polivinil (10^3-10^4 Gy), polistirenul (10^4-10^6 Gy), acetatul de celuloză (10^5-10^7 Gy). Aceste dozimetre posedă o capacitate de păstrare îndelungată a informației („fading” mic) și o precizie de 2-5%.

4. Dozimetrele radiofotoluminescente (RFL)

Schulman, Ginther și Klick au găsit că sticlele alumino-fosfatoase activate cu Ag dezvoltă cel puțin două tipuri de centre de culoare la iradiere. Un tip de centru răspunde de efectul colorării, discutat mai sus, celălalt tip de centru (atomii de Ag), mult mai stabil, absoarbe lumina U.V. și emite o fluorescență oranj. Intensitatea acestei lumini, măsurată de un fotomultiplicator și comparată cu un standard de luminescență, este folosită la măsurarea dozei de radiații absorbite în sticle.

După expunerea la radiații, răspunsul RFL nu atinge valoarea sa maximă decât după o anumită perioadă de timp, care depinde de temperatură și de compoziția particulară a sticlei, deoarece electronii liberi produși de radiația nucleară sunt parțial captați în capcane și astfel sunt pierduți pentru crearea centrelor de fluorescență. Prin acumularea de energie termică (la temperatura camerei), electronii devin din nou liberi și sunt capabili să creeze alte centre de fluorescență.

Imediat după iradiere, sticlele Toshiba, de exemplu, indică 70% din valoarea finală, după o oră de la iradiere, la temperatura camerei – 80% și după 24 ore – 90%. Prin călirea sticlei la 100°C timp de o oră, se poate scurta considerabil durata de „dezvoltare” a răspunsului.

Sensibilitatea dozimetrelor radiofotoluminescente este mult mai mare decât a celor care utilizează efectul colorării. Domeniul de doze măsurat se întinde de la 10^{-1} la 10^3 Gy, depinzând de dimensiunile dozimetrului și de tipul de fluorimetru utilizat.

Yokota, Nakajima și Sakai au obținut o sticlă sensibilă în domeniul de 5×10^{-4} – 50 Gy, cu o acuratețe de $\pm 5\%$. Această sticlă conține cantități relativ mari de B și Li, iar fluorimetrul a fost construit special pentru o eficiență optimă.

Un mare neajuns al dozimetrelor menționate este dependența răspunsului lor de energia radiației incidente. Acest neajuns poate fi înlăturat printr-o metodă de protecție selectivă a dozimetrului, care păstrează aproximativ constantă ($\pm 20\%$) dependența de energie a dozimetrului între 80 keV și 1,2 MeV. Metoda constă în utilizarea unui scut perforat, metalic, a cărui grosime a fost astfel calculată încât să medieze răspunsul sticlei pentru energiile mari, iar perforațiile să permită pătrunderea radiațiilor moi, care astfel ar fi complet atenuate de scut.

În ultimul timp s-a acordat o atenție deosebită purității chimice și perfecționării optice în sinteza sticlelor fosfatoare activate cu Ag. Aceasta a condus la reducerea fluorescenței impurităților. De asemenea modificările semnificative în construcția fluorimetrului au condus la creșterea sensibilității acestor dozimetre, înregistrându-se doze sub 10^{-4} Gy.

5. Dozimetre bazate pe efectul degradării luminescenței

Principiul de funcționare a dozimetrelor bazate pe efectul degradării luminescenței poate fi descris astfel: solidul neiradiat este luminescent; noile centre induse la iradiere nu sunt luminescente, ci chiar sting luminescența normală. Emisia continuă atâta timp, cât este aplicată lumina de măsurare.

Primul, care a observat că prin bombardare cu particule α cristalele de antracen își diminuează eficiența scintilației, a fost Birks. Fenomenul a fost investigat ulterior pentru diferite materiale de Schulman, iar mai târziu de Attix. Ei au constatat că antracenu și p-4-fenilul presat în foite pot fi folosite ca dozimetre, acoperind intervalele de doză $5 \times 10^3 - 5 \times 10^5$ Gy și respectiv $10^5 - 5 \times 10^7$ Gy.

6. Dozimetre cu distrugerea centrelor prin procedura de măsurare a dozei

În această categorie de dozimetre sunt incluse aparatele respective la care luminescența este stimulată optic și termic (termoluminescența).

7. Dozimetrele bazate pe luminescența stimulată optic

Iluminând cu lumină IR aceste dozimetre expuse anterior la radiații, se observă o luminescență în regiunea vizibilă a spectrului. Nu oricare fosfor poate emite luminescență stimulată optic și îndeplini caracteristicile necesare unui material dozimetric. Fosforul SrS:Eu, Sm studiat de Antonov-Romanovski prezintă un răspuns liniar între $5 \times 10^{-5} - 10^{-2}$ Gy, însă are un fading mare (40% din informație se pierde în 2 săptămâni de la iradiere) dependent de doză, așa încât interpretarea rezultatelor este dificilă. Acestea sunt motivele pentru care sistemul dozimetric menționat nu este implementat pe larg.

Mandeville și Albrecht au folosit lumina vizibilă la stimularea luminescenței cristalelor iradiate de KCl:Ag, totodată ei au studiat comportamentul liniar al cristalelor iradiate în funcție de doză, în intervalul de $10^{-4} - 10^2$ Gy.

8. Dozimetrele termoluminescente

La aceste dozimetre luminescența apare ca urmare a încălzirii cristalului iradiat, deci este o luminescență stimulată termic, de unde și denumirea de *radiotermoluminescență* sau, mai pe scurt, *termoluminescență* (TL). Termoluminescența este o variantă de fosforescență, iar materialele care posedă această proprietate poartă numele de *fosfori*. Întrucât centrele lor active sunt relativ stabile la temperatura mediului ambiant, aceste materiale au fost denumite fosfori cu acumulare (stocare).

În comparație cu toate celelalte sisteme dozimetrice descrise mai sus, dozimetrele TL sunt mult mai sensibile și pot măsura doze cuprinse între $10^{-6} - 10^5$ Gy. Numărul fosforilor folosiți în dozimetria termoluminescentă (TLD) este în continuă creștere, posibilitățile descoperirii și perfecționării lor fiind departe de a fi epuizate. De altfel, dozimetria termoluminescentă s-a dezvoltat considerabil în ultimii douăzeci de ani, factorul decisiv fiind apariția pe piață a materialelor de detecție performante și a sistemelor automate de citire a dozimetrelor.

5.6. Dozimetria termoluminescentă

1. Principiile fizice ale dozimetriei termoluminescente

Detectarea fotonilor și a particulelor încărcate electric se bazează pe efectele induse prin iradiere în solid datorită acumulării de energie în defectele rețelei. Această energie absorbită este, după încălzirea cristalului, transformată în radiotermoluminescență, energie acumulată (defectele induse de iradiere) și căldură (tranziții neradiative). Corelația acestor componente depinde de natura cristalului și este o funcție complicată de doză, debitul dozei și temperatură.

2. Natura centrelor de luminescență

Luminescența fosforilor cristalini utilizați în dozimetria radiațiilor se datorează în cea mai mare măsură prezenței imperfecțiunilor punctiforme obișnuite ale rețelei (vacanțe de rețea) sau introducerii impurităților (activarea) în cristal, având ca rezultat inducerea modificărilor locale ale câmpului electric intern al cristalului.

a) Vacanțe de rețea

Cea mai simplă imperfecțiune este o vacanță de rețea, care reprezintă un atom sau un ion lipsă și este cunoscută sub numele de *defect Schottky* (fig. 24).

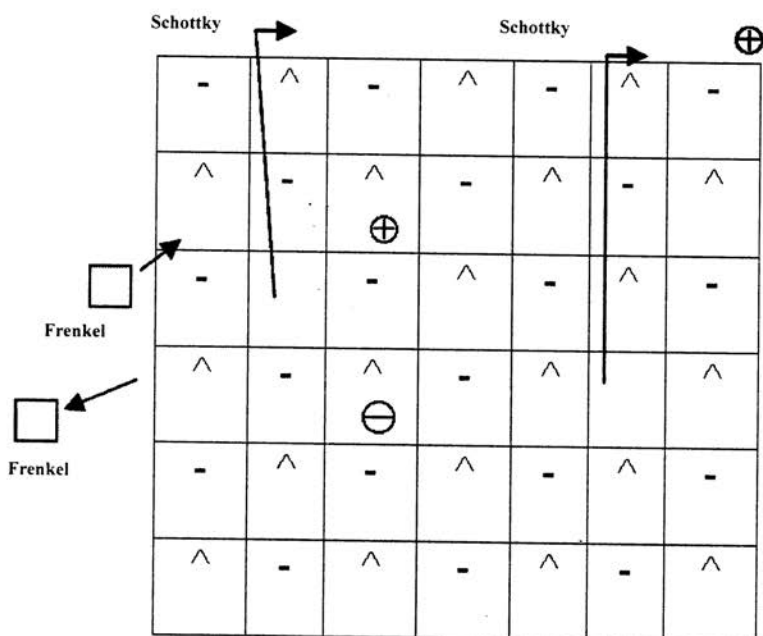


Fig. 24. Defectele de tip Schottky și de tip Frenkel într-un cristal ionic.

Săgețile indică deplasarea ionilor. Într-un defect Schottky ionul se mișcă înspre suprafața cristalului; într-un defect Frenkel el se duce într-o poziție interstițială.

Un astfel de defect se poate crea într-un cristal perfect, transferând un atom dintr-un nod al rețelei din interior, spre un nod al rețelei de pe suprafața cristalului. Energia necesară este de ordinul a 1 eV, egală cu energia legăturii cu vecinul de ordinul întâi.

Pentru păstrarea neutralității cristalului se creează un număr aproximativ egal de vacanțe pozitive și negative. Numărul perechilor de vacanțe ionice create într-un cristal ionic rezultă din relația:

$$n \approx N \exp(-E_p / 2KT),$$

unde: N – numărul de atomi existenți, E_p – energia de formare a unei perechi, T – temperatura de echilibru, K – constanta lui Boltzmann.

b) Defectul Frenkel

Un alt gen de imperfecțiune a rețelei este defectul de tip Frenkel, care constă într-un atom transferat de la un nod spre o poziție interstițială. Numărul unor astfel de defecte într-un cristal rezultă din relația:

$$n \approx (N N')^{1/2} \exp(-E_i / 2KT),$$

unde: N – numărul nodurilor, N' – numărul interstițiilor, E_i – energia pentru îndepărtarea unui atom în poziție interstițială.

Existența unor astfel de imperfecțiuni are consecințe importante atunci când cristalul absoarbe o cantitate de energie.

Dacă este eliberat în acest caz un electron, el va fi capturat în vacanțele negative de rețea, care sunt regiuni de sarcină pozitivă localizată și care joacă rolul de capcană electronică. Prin capturarea acestui electron de către vacanța negativă s-a format un așa-numit centru F sau centrul de culoare.

c) Centrul F sau centrul de culoare

Se comportă analog unui atom de hidrogen, având nivele discrete de energie între care sunt posibile tranziții. Absorbția fotonilor de lumină cu frecvență proprie ridică electronul din starea fundamentală într-o stare excitată, ceea ce duce la colorarea cristalului. Prin întoarcerea electronului din starea excitată în starea fundamentală se emite luminescența.

Centrele F se asociază între ele sau cu alte defecte ale rețelei și formează alte centre:

- centrul R_1 = centrul F cu o vacanță de ion negativ;
- centrul R_2 = 2 centre F asociate;
- centrul M = centrul F asociat cu două vacanțe de semn opus;
- centrul $F' =$ vacanță de ion negativ la care s-au atașat doi electroni.

Aceste centre au nivele discrete de energie situate în zona interzisă a cristalului, imediat sub banda de conducție a cristalului și pot constitui așa-numitele centre luminogene izolate.

d) Centrul V_1 . Este centrul opus centrului F, fiind format dintr-un gol pozitiv capturat într-o vacanță de ion pozitiv. Acest centru are nivele energetice discrete între care au loc tranziții. Nivelele sunt situate în banda interzisă a cristalului, deasupra benzii de valență.

Din centrele V_1 derivă următoarele centre:

- centrul V_2 = două centre V_1 asociate;
- centrul V_3 = centrul V_1 asociat cu o vacanță de ioni pozitivi;
- centrul V_4 = centrul V_1 asociat cu două vacanțe de semn opus.

Aceste centre nu apar întotdeauna în cristal. Fiecare tip de rețea are tipurile ei proprii de defecte.

e) Impurități

Impuritățile sunt atomi străini care există în cristal fie în stare de ioni, fie în poziție interstițială, fie în locuri ocupate în mod normal de ionii rețelei. Aceste impurități introduc nivele energetice discrete în banda interzisă a cristalului.

De cele mai multe ori, cristalele luminescente conțin două tipuri de impurități:

- În cazul luminescenței neînsoțite de fotoconductivitate, impuritatea care răspunde de absorbția energiei se numește **sensibilizator**, iar impuritatea care emite fotonul de luminescență se numește **activator**. Transportul de energie de la sensibilizator la activator se face, conform celor mai recente teorii, prin transfer de rezonanță.

Un exemplu constituie fosforul $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \times \text{Ca}(\text{FCl})_2$, în care antimoniul este sensibilizator, iar Mn – activator.

- În cazul luminescenței însoțite de fotoconductivitate, transferul de energie de la centrul de absorbție la centrul de emisie se face prin purtătorii de sarcini: electronii și golurile pozitive. Impuritățile se numesc respectiv **co-activatori** și **activator**.

Astfel de fosfori sunt: ZnS activată cu Cu și co-activată cu Cl, CaF_2 cu anumite impurități sau vacanțe de rețea (centre F, V etc.).

Perechea co-activator – activator este de fapt o pereche donator-acceptor și introduce nivele energetice discrete în banda interzisă a cristalului, în regiunea imediat sub limita inferioară a bandei de conducție (co-activatorul = donator) și în regiunea imediat deasupra limitei superioare a bandei de valență (activator = acceptor).

Există numeroși fosfori pentru care este suficient un singur tip de impuritate. În acest caz impuritatea este și centrul de absorbție, și centrul de emisie, constituind așa-numitul **centru luminogen izolat**. Fosfori de acest gen sunt halogenurile de K activate cu Tl, CaF₂ activată cu Ce, Eu sau Dy. De altfel, CaF₂ : Dy a fost folosit de autor la înregistrarea dozelor rezultate din utilizarea radiațiilor X în radiologia diagnostică.

3. Mecanismele termoluminescenței

În dozimetria termoluminescentă mărimea înregistrată este semnalul TL care crește pe măsură ce are loc recombinarea radiativă a electronilor eliberați din capcane cu goluri libere.

Figura 25 prezintă cel mai simplu model de termoluminescență pentru fosfori cu un singur tip de capcană electronică (cinetică monomoleculară).

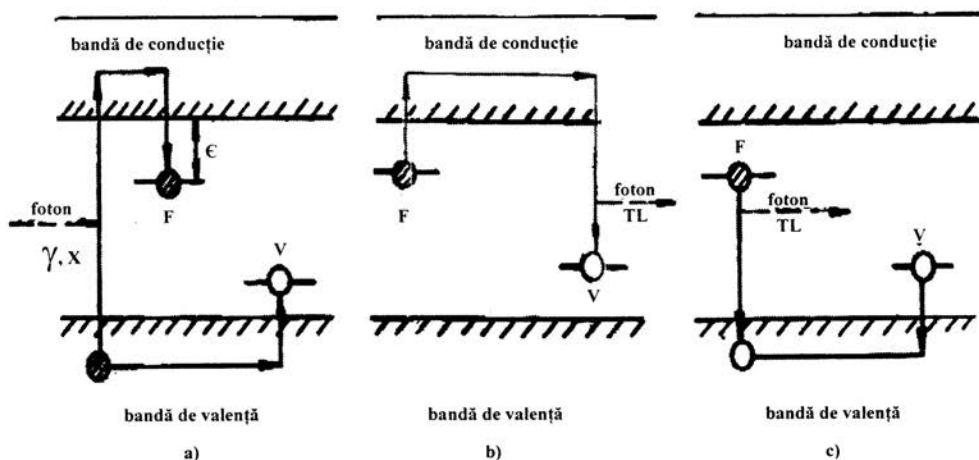


Fig. 25. Cel mai simplu model de termoluminescență.

a) Cinetica monomoleculară

În urma iradierii cristalului, electronul este eliberat din banda de valență și capturat în nivelul capcanei electronice. Golul migrează în banda de valență până când este și el capturat în nivelul V al capcanei pentru goluri.

Electronul rămâne în capcană pentru mult timp. La încălzirea cristalului, electronul absoarbe o cantitate de energie și este expulzat din capcană în banda de conducție unde se mișcă liber până când se recombina cu golul din nivelele V. În acest caz se emite luminescența. Fosforul este încălzit cu o rată constantă $\beta^\circ\text{K/s}$, până când toți electronii sunt eliberați din capcane.

Dacă τ este durata medie de viață a unui electron în capcană, atunci probabilitatea pe unitate de timp a eliberării electronului din capcană rezultă, conform teoriei Randall-Wilkins, din relația:

$$P = \tau^{-1} = s e^{-\frac{E}{K\tau}}, \text{ unde:}$$

E – adâncimea capcanei, s – factorul de frecvență, T – temperatura absolută, τ – durata medie de viață a centrului activ, K – constanta lui Boltzmann.

Intensitatea luminescenței este dată de viteza eliberării electronilor din capcană:

$$L = -\frac{dn}{dt} = n P = n s \exp(-E / KT)$$

Din rata de încălzire a fosforului $\beta = \frac{dT}{dt}$ rezultă $dt = \frac{dT}{\beta}$ și prin înlocuire în formula luminescenței se obține:

$$-\frac{dn}{dt} = -\beta \frac{dn}{dT} = n s \exp(-E / KT)$$

Din integrarea acestei ecuații rezultă numărul electronilor eliberați din capcane la temperatura T :

$$n_T = n_0 \exp \int_{T_0}^T -\frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) dT,$$

iar intensitatea TL rezultă din relația:

$$L_T = P n_T = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \exp \int_{T_0}^T -\frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) dT$$

Forma grafică a unei astfel de ecuații este dată pe figura 26.

Aria de sub aceste „curbe de strălucire” este proporțională cu n_0 – numărul inițial de electroni capturați în capcane, care este proporțional cu doza de iradiere a cristalului. Înălțimea picului de strălucire este de cele mai multe ori măsura dozei de iradiere.

Curba de strălucire a $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ este compusă din două picuri: cel de la temperatura joasă descrește rapid la temperatura camerei în timp ce picul dozimetric rămâne stabil. Picul instabil a fost înregistrat la 3,4 min.; 8,6 min.; 27,3 min.; 69,2 min. și 960 min. după iradiere.

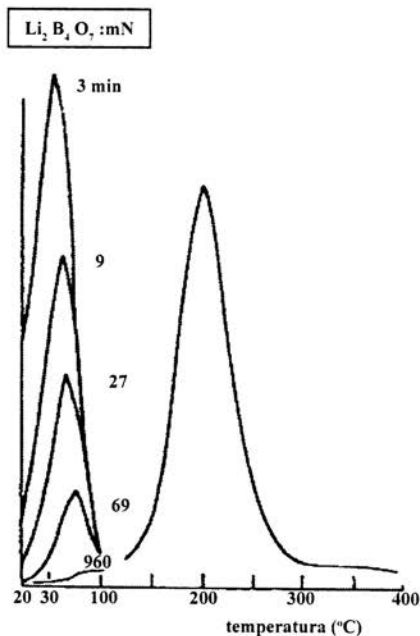


Fig. 26. Curba de strălucire a boratului de litiu dopat cu mangan.

b) Cinetica bimoleculară

În cazul fosforilor dublu activați, impuritatea absorbantă este numită co-activator și are nivele de energie în regiunea imediat sub banda de conducție, iar impuritatea emițătoare se numește activator și are nivele energetice discret localizate imediat deasupra limitei superioare a bandei de valență.

Să considerăm cazul cel mai simplu în care cristalul posedă un singur tip de centru luminescent (activatorul) L și un singur tip de capcană electronică (co-activatorul) M. Figura 27 reprezintă schematic procesele implicate în luminescența unui astfel de fosfor.

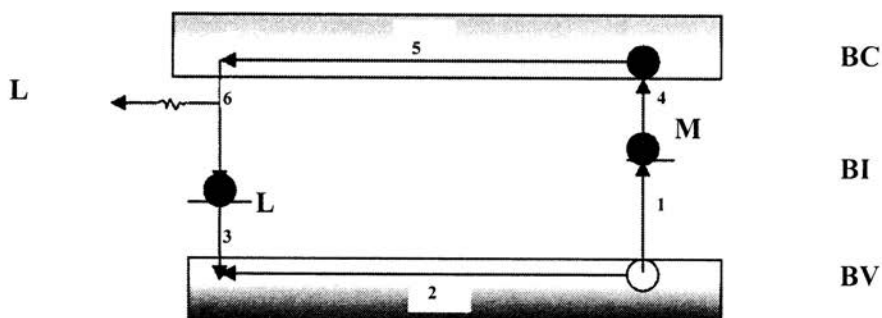


Fig. 27. Mecanismul apariției luminescenței în cazul celor mai simpli fosfori dublu activați (cinetica bimoleculară).

Inițial centrul luminescent are starea fundamentală ocupată. Probabilitatea de recapturare a electronului în banda de conducție este egală cu probabilitatea de capturare a acestuia de către centrul de emisie golit. În urma excitării cristalului în banda de absorbție fundamentală se formează electroni liberi și goluri. Dacă n electroni sunt scoși prin excitare din banda de valență și capturați în capcane, atunci n goluri din banda de valență difuzează spre centrele luminescente L , recombinaându-se cu electronii din centre și deci n centre rămân vacante. Dacă M este numărul de capcane și n dintre ele sunt pline, atunci goale rămân $M-n$.

Probabilitatea recombinării electronului de conducție cu un centru de emisie golit rezultă din relația:

$$P = \frac{n}{n + (M - n)} = \frac{n}{M}$$

Cinetica luminescenței este următoarea:

$$L = -\frac{dn}{dt} = \frac{n}{M} n s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)$$

unde: $n s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)$ este numărul de electroni eliberați din capcane într-o secundă. Atunci:

$$L = -\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{M} s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right), \text{ de unde:}$$

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{s}{M} n^2 \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) dt$$

$$\frac{1}{n} = \frac{s}{M} t \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) + C$$

Pentru $t = 0$, $\Rightarrow C = \frac{1}{n_0}$ și se obține:

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n_0} + \frac{s}{M} t \exp\left(-\frac{E}{KT}\right), \text{ de unde:}$$

$$n = \frac{1}{n_0 \left[1 + \frac{sn_0 t}{M} \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)\right]}$$

Intensitatea luminescenței la timpul t va fi:

$$L_t = \frac{n^2}{M} s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) = \frac{n_0^2 s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)}{M \left[1 + \frac{sn_0 t}{M} \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)\right]^2}$$

Se observă că intensitatea luminescenței depinde în acest caz de n_0^2 , cinetica luminescenței fiind de tip bimolecular, iar pentru acest caz al fosforului cu un singur tip de centru luminescent și un singur tip de capcană electronică, fenomenul de capturare fiind luat în considerare, forma curbei de termoluminescență rezultă din relația:

$$L_t = \frac{n_0^2 s \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)}{M \left\{ 1 + \frac{n_0}{M} \cdot \frac{s}{\beta} \int_0^T \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) dT \right\}^2}$$

În comparație cu cele pentru cazul cineticii monomoleculare, curbele de termoluminescență pentru cazul bimolecular sunt mai largi, restul caracteristicilor fiind identice dozimetric.

După citire, materialul TL este fie în starea sa originală și poate fi refolosit, fie necesită tratament termic, numit regenerare, în scopul aducerii lui la starea inițială.

4. Construcția sistemelor termoluminescente

a) Dozimetre TL

Cei mai utilizați detectori TL sunt obținuți prin doparea fosforilor, cum ar fi: fluorura de litiu (LiF), borura de litiu ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), sulfatul de calciu (CaSO_4) și fluorura de calciu (CaF_2), cu impurități numite activatori: de exemplu, LiF:Mg,Ti este fluorura de litiu dopată cu magneziu și titan. Toate materialele TL sunt disponibile sub formă de pulbere sau de dozimetre solide. Acestea din urmă pot fi monocristale sau extruzii policristaline (discuri extrudate, pastile sintetizate, baghete cilindrice, sferoizi, paralelipiede etc). O altă formă este cea a pulberii omogene încorporate într-o masă plastică (PTFE, teflon), cauciuc siliconic, după care se realizează formate standard: foi, discuri, benzi etc.

Formatele presate sau înglobate în plastic se pretează foarte bine la realizarea dozimetrelor individuale pentru supravegherea personalului expus profesional, dozimetre sub formă de casete, inele, brățări sau montate într-o cartelă tip legitimație împreună cu un cod de identificare a purtătorilor.

b) Aparate de citire

Pentru toate sistemele dozimetrice este caracteristic faptul că procesele de citire eliberează energia acumulată și le fac utile pentru alte măsurători. Citirea poate fi efectuată o singură dată, iar metoda de citire se bazează pe faptul că termoluminescența este o fosforescență accelerată termic.

Alegerea schemei de încălzire este flexibilă. Forma curbei de încălzire, temperatura maximă atinsă și timpul de observație sunt toate condiționate de expunerea minimă detectabilă și de energia acumulată care se eliberează în timpul procesului. Figura de mai jos prezintă schematic diagrama aparatului clasic pentru citirea dozimetrelor termoluminescente.

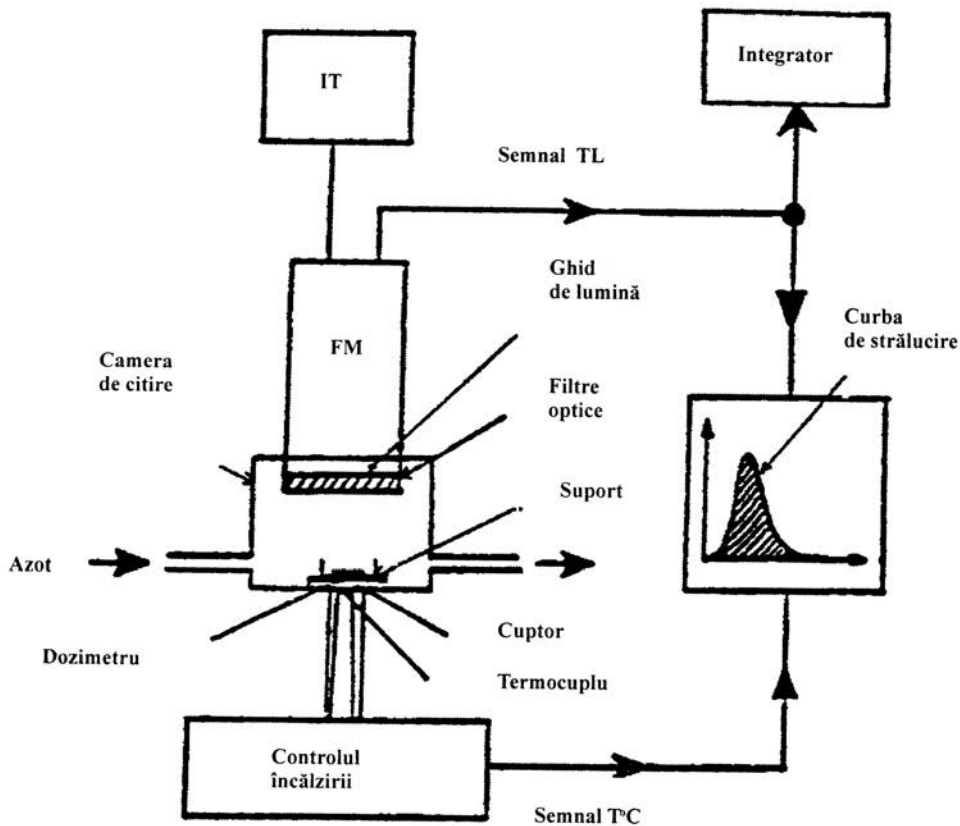


Fig.28. Schema-bloc de principiu a unui aparat clasic de citire a dozimetrelor TL.

Aparatul clasic pentru citirea dozimetrelor termoluminescente cuprinde următoarele părți principale: sisteme de încălzire și măsurare (înregistrare) a temperaturii, sistemul de detecție a fluxului luminos și sistemul de prelucrare a datelor și afișarea rezultatelor (fig. 28). Este numit și termoluminemetru, întrucât măsoară luminescența excitată termic.

Cel mai frecvent detectorul iradiat este plasat pe un suport metalic în interiorul camerei de citire. Suportul este încălzit în diferite moduri la 2 temperaturi diferite: temperatura de preîncălzire necesară ștergerii picurilor instabile și temperatura de citire folosită la colectarea informației de la

picurile dozimetrice. În general, temperatura suportului este măsurată de un termocuplu în contact strâns cu el. Camera de citire ar trebui continuu traversată de un curent încălzit de azot pentru a reduce fenomenele parazite și a scădea fondul.

Lumina emisă de materialul TL încălzit trece prin unul sau mai multe filtre optice înainte de a fi detectată de fotomultiplicator (FM). Curentul de ieșire de la FM este proporțional cu emisia luminoasă și, astfel, cu doza absorbită primită anterior de dozimetrul TL.

Aparatele de citire TLD posedă diferite sisteme de încălzire: suportul metalic conținând materialul TL poate fi încălzit de un curent electric sau prin contact cu un cuptor ori cu un „deget” fierbinte acționat de un mecanism de ridicare. Cinetica de încălzire este fie liniară, fie izotermică. În primul caz, materialul TL este încălzit progresiv la temperaturile de preîncălzire și citire. În cazul cineticii izotermice, materialul TL este cvasiinstantaneu încălzit de cuptoare izotermice la ambele temperaturi și citirile durează, în general, mai puțin de 10 s.

În fiecare caz pentru a obține o reproductibilitate bună, este necesar un contact strâns între dozimetrul TL, suportul și sistemul de încălzire.

Există și alte proceduri de încălzire, cum ar fi cea cu flux de azot sau aer cald, cu radiații IR produse de un puls luminos intens produs de o lampă cu halogen sau cu un fascicul laser. Aparatele de citire destinate să citească un număr mare de dozimetre în timp scurt au în general cinetică de încălzire izotermică sau încălzesc dozimetrele TL cu gaz fierbinte.

Detectarea luminii TL depinde de compoziția fotocatodului tubului fotomultiplicatorului și de transmisia spectrală a ferestrei sale. În majoritatea cititoarelor TL fotocatozii au picul de sensibilitate de circa 400 nm în concordanță cu emisia albastră a LiF sau $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$: Cu, dar nu și pentru lumina galben-roșie a $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:Mn. Plasarea filtrelor adecvate în fața ferestrei FM permite aparatului de citire adaptarea la lungimea de undă a oricărui tip de dozimetru TL folosit. Un aparat bun trebuie să aibă un FM cu o largă transmisie spectrală și să permită o schimbare rapidă a filtrelor necesară adaptării la diferite materiale TL.

Pentru a obține o acuratețe optimă în cazul utilizării pulberii TL, cantitatea de pulbere ca și condițiile de citire trebuie definite cu acuratețe și făcute corecțiile necesare. Variația răspunsului cu mase de material TL trebuie stabilită pentru condițiile practice de citire, deoarece depinde de cinetica de încălzire. Pentru majoritatea materialelor TL semnalul este proporțional cu masa

atunci când citirea se face cu cinetică liniară de încălzire: fie se face o corecție cu probe de greutate diferită, fie se aplică probe de greutate egală.

Unele materiale, cum ar fi $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$; Cu, au un răspuns care poate fi considerat independent de masă atunci când aparatul de citire este automat și utilizează o cinetică izotermică. În acest caz nu este necesară cântărirea pulberii, o simplă măsurătoare volumetrică fiind suficientă.

c) Proprietățile dozimetrice ale fosforilor termoluminescenți

Tabelul 6 însumează proprietățile dozimetrice ale celor mai utilizați fosfori.

Tabelul 6

Proprietățile principalilor fosfori utilizați în dozimetria termoluminescentă

Denumirea	Activatori	Sensibilitate γ relativă	Temperatura maximului de strălucire ($^{\circ}\text{C}$)	λ (TL), (nm)	Z_{ef}	Domeniu (Gy)	Fading	Dependență energetică
LiF	Mg, Ti	1	195	400	8,2	$5 \cdot 10^{-5} - 10^3$	10%/lună	1,3
MgB_4O_7	Dy	7	210	480, 570	8,4	-	10%/2 luni	1,5
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Mn	0,4	210	600	7,4	$10^{-4} - 10^3$	10%/lună	0,98
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Cu, Ag	1	185	368	7,4	$5 \cdot 10^{-5} - 10^4$	10%/lună	0,98
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Cu	8	205	368	7,4	$5 \cdot 10^{-5} - 10^4$	9%/2 luni	0,98
CaSO_4	Tm	3,2	210	425	15	$10^{-6} - 10^3$	10%/lună	11,5
CaSO_4	Dy	38	210	480, 570	15	$10^{-6} - 10^3$	3%/lună	11,5
CaSO_4	Mn	70	110	500	15	$10^{-6} - 10^3$	60%/zi	11,2
CaF_2	Dy	16	200	480, 570	16	$10^{-6} - 10^3$	12%/lună	15,6
CaF_2	Mn	5	260	500	16	$10^{-6} - 10^3$	10%/lună	15,4

CaF ₂	Natural	23	260	380	16	10 ⁻⁵ -10 ³	-	14,5
Mg ₂ SiO ₄	Tb	53	195	552	11	10 ⁻⁶ -10 ³	3%/lună	4,5
BeO	-	3,1	180 – 220	200 – 400	7,2	10 ⁻⁴ -10 ³	5%/lună	0,87
Al ₂ O ₃	-	5	250	425	10,2	10 ⁻⁵ -10 ³	5%/2 săpt.	4,5

Notă:

1 – față de LiF considerată unitate;

2 – raportul răspunsului la 30 keV și 1 MeV.

Pentru ca un material să poată fi folosit în dozimetria TL, este necesar ca el să îndeplinească o serie de condiții:

- concentrație ridicată a capcanelor pentru electroni și goluri;
- o eficiență înaltă a luminescenței când electronii (sau golurile) sunt eliberați termic și recombină;
- o stocare îndelungată a electronilor sau golurilor la temperatura de lucru (= E mare și s mic);
- o distribuție simplă a capcanelor, de preferat un singur tip de capcană pentru simplificarea operării și interpretării citirii;
- o distribuție spectrală a luminescenței care să armonizeze cu detectorul, în general un fotomultiplicator sensibil în albastru și cât mai departe de emisia incandescentă a sursei de căldură (Sunt preferate emisiile: UV apropiat, albastru sau verde; cele oranj sau roșu sunt dezavantajoase);
- stabilitatea capcanelor, activităților și a rețelei cristalului la iradiere așa încât iradierea să umple capcanele, dar să nu creeze noi capcane sau noi activatori și nici să nu le distrugă;
- independență de energie, sensibilitate sau insensibilitate la neutroni, în funcție de scopul destinat dozimetrului, de doză și rata dozei;
- domeniul cât mai extins al dozelor măsurabile cu incertitudine redusă.

Desigur că nu toate aceste cerințe sunt simultan realizate într-un grad înalt, dar se cunosc și se utilizează câteva materiale TL care reprezintă un compromis satisfăcător.

Printre materialele TL care pot fi considerate echivalente țesutului moale sau osos în domeniul energiilor utilizate în radiodiagnostic sau radioterapie sunt cele prezentate în *tabelul 7*.

**Diferite materiale TL echivalente cu țesutul moale,
pulmonul sau osul**

Țesutul moale sau pulmonul	Os
LiF : Mg, Ti	CaSO ₄ : Mn
LiF : Mg, Ti, Na	CaSO ₄ : Dy
Li ₂ B ₄ O ₇ : Mn	CaF ₂ : Mn
Li ₂ B ₄ O ₇ : Cu	CaF ₂ : Dy

În funcție de mărimea numărului atomic efectiv, materialele TL prezintă o dependență a răspunsului de energia radiațiilor, îndeosebi în spectrul energetic de sub 100 keV, fenomen ilustrat în *figura 29*.

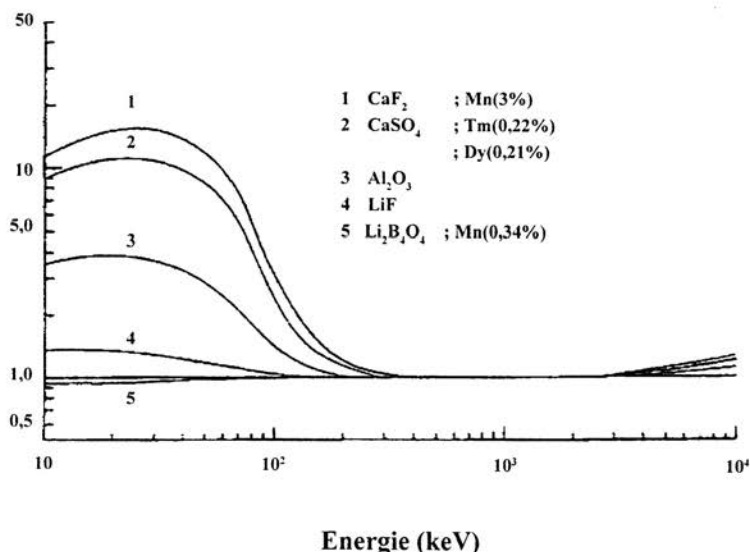


Fig.29. Dependenta de energie a raspunsului pentru principalii fosfori TL.

Indiferent de materialul TL utilizat, intensitatea TL pe unitate de doză absorbită este ilustrată de curba tipică prezentată în *figura 30*.

La valori relativ scăzute de doză absorbită, răspunsul materialului TL este liniar, originea liniei drepte fiind semnalul TL de fond, B, a forului neiradiat (*fig. 30*).

Deasupra dozei D₁ care limitează regiunea de liniaritate răspunsul devine supraliniar, saturându-se la doza D_s și apoi scăzând. Aceasta se datorează defectelor produse prin iradiere în rețeaua cristalului TL și care conduc la

o creștere a răspunsului detectorului, întrucât defectele pot deveni capcane electronice și astfel să participe la procesul TL. Pentru fosforii utilizați în mod curent în fizica medicală *tabelul 8* indică domeniul de doză corespunzător zonei de liniaritate ca și doza de saturație.

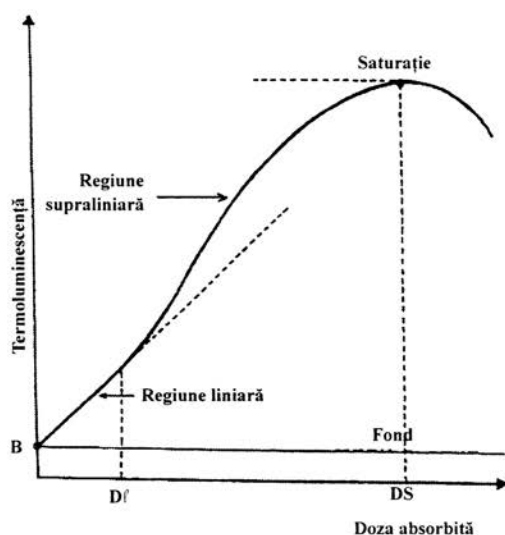


Fig. 30. Variația termoluminescenței în funcție de doza absorbită.

Tabelul 8

Variația în funcție de doză a răspunsului diferitor materiale TL utilizate în dozimetria in vivo

Materialul TL	Răspuns în funcție de doză (Gy)	
	Zona liniară	Saturație
LiF	$5 \times 10^{-5} - 1$	10^3
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$	$10^{-4} - 3$	3×10^4
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$	$5 \times 10^{-4} - 120$	10^3
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	$10^{-6} - 30$	10^3
$\text{CaSO}_4:\text{Mn}$	$10^{-7} - 30$	10^2
$\text{CaF}_2:\text{Mn}$	$10^{-5} - 10$	10^3
$\text{CaF}_2:\text{Dy}$	$10^{-5} - 10$	10^4

Apariția non-liniarității în curbe de răspuns la o doză a detectorului TL nu exclude utilizarea sa în TLD, dar necesită aplicarea unor factori de corecție. Nu se recomandă utilizarea dozimetrelor TL în domeniul de doză subliniar din zona saturației. Este necesar de notat faptul că supraliniaritatea și doza de saturație pot fi afectate de condițiile de încălzire, de iradierile anterioare ca și de tratamentele termice.

Unele materiale TL, cum ar fi LiF, sunt dependente de tratamentele termice, numite de revenire sau regenerare, efectuate înaintea primei lor iradiere și după fiecare utilizare. Când aceste tratamente nu sunt efectuate, sensibilitatea și fondul dozimetrelor TL sunt alterate considerabil. Mai mult, proprietățile dozimetrice nu rămân constante. Acestea se datorează reacțiilor de aglomera-re a defectelor care pot fi induse pe durata procedurii TL, ceea ce conduce la o puternică dependență a supraliniarității și sensibilității dozimetrului de ratele de încălzire. De exemplu, înaintea primei utilizări, tratamentul termic pentru $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ dopat cu cupru sau cu mangan constă în încălzirea de la 15 minute până la o oră la 300°C . Nu sunt necesare alte tratamente termice înaintea unei refolosiri.

Regenerarea este mult mai complicată pentru unele variante ale LiF și poate afecta proprietățile dozimetrice ale materialului TL, atunci când se efectuează incorect. Aceasta depinde de forma în care LiF a fost manufacturat și de adaptarea procedurii de călire la indicațiile producătorului. De exemplu, bastonașele sau discurile de LiF:Mg,Ti produse de Harshaw trebuie călite de la una până la două ore, după care urmează să stea alte 24 de ore la 80°C , după fiecare utilizare.

Deoarece în cursul examenelor radiologice, detectori de LiF (TLD-100) și $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (TLD-200) se folosesc mai des de rutină, vom pune accentul pe proprietățile dozimetrice ale acestor două materiale termoluminescente.

d) LiF (TLD-100)

LiF (TLD-100) este, până în prezent, fosforul cel mai larg utilizat în aplicații, cel mai amănunțit studiat și cel mai frecvent produs în serie. Acest dozimetru are avantajul unei foarte mici dependențe de energia radiațiilor și a unei bune reproductibilități ($\pm 2\%$). Totuși, acest dozimetru prezintă dezavantajul unei mari diferențe în sensibilitatea TL de la un cristal la altul și chiar între piesele tăiate din același cristal există diferențe care pot merge până la 100%,

în funcție de locul din care provin (vârful cristalului sau partea cilindrică). Un exemplu îl constituie curbele de strălucire din figura de mai jos (fig. 31).

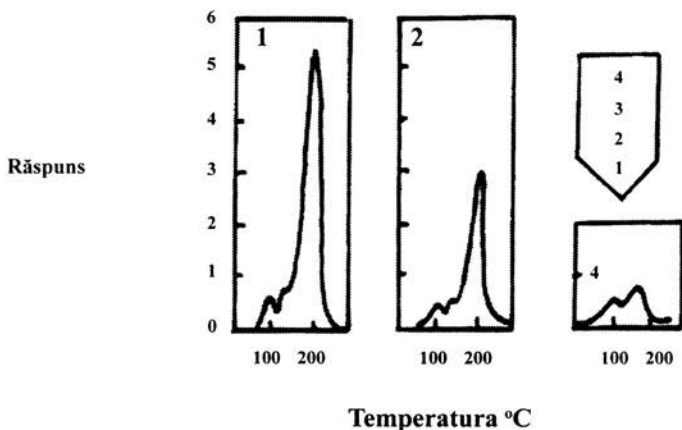


Fig. 31. Curbele de strălucire pentru probe tăiate din același cristal de LiF.

Dozimetrele TL de LiF se folosesc sub formă de pulbere cristalină, pulbere necristalină, pulberi înglobate în materiale plastice, de exemplu, teflon. Măsurătorile cu dozimetru sub formă de pulbere sunt mai dificile, deoarece necesită măsurători cantitative foarte precise. Domeniul de doză acoperit de LiF (zona lineară) este între $10 \mu\text{Gy}$ și 10Gy (Harshaw).

Curba de strălucire pentru LiF (TLD-100 Harshaw) prezintă 6 picuri la $80, 105, 118, 160, 195$ și la 230°C . Maximele 1-5 au la temperatura camerei timp de înjumătățire de respectiv 5 minute, 10 ore, 6 luni, 7 ani și respectiv 80 de ani. În consecință numai picurile 4 și 5 corespund utilizării în dozimetrie. Picul 6 apare numai după o tratare termică post-iradiere.

Figura 32 relevă curba de strălucire tipică.

Cele 2 picuri dozimetrice principale (4 și 5) și care au o descreștere simplă, exponențială, conformă teoriei lui Randall-Wilkins, corespund capcanelor de profunzime $1,2 \text{eV}$ și respectiv $1,25 \text{eV}$ cu factori de frecvență între 10^{11} și 10^{12}s^{-1} .

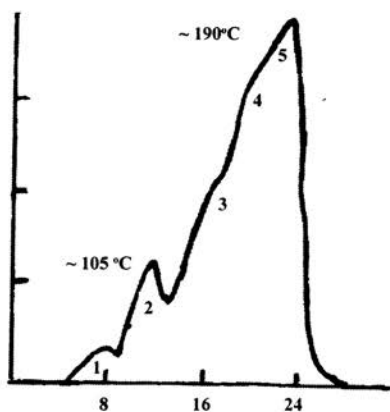


Fig. 32. Curba de strălucire tipică a TLD-100 după tratament termic timp de o oră la 400°C .

Spectrul de termoluminescență de LiF, fără a încerca separarea celor câteva picuri din curba de strălucire, este prezentat în *figura 33*.

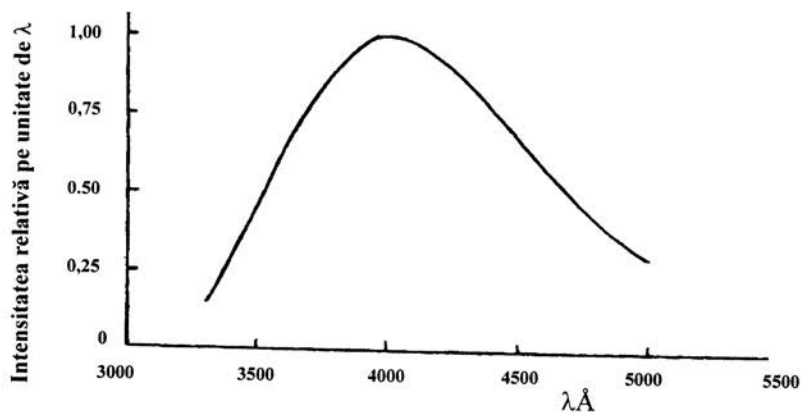


Fig. 33. Spectrul de termoluminescență pentru LiF (TLD-100).

Spectrul are maximumul la 400 nm, cu o semilățime de 120 nm.

După citire și înainte de o nouă folosire este necesar un tratament termic de revenire, fără de care dozimetrele TL cu LiF nu își recapătă proprietățile inițiale. Tratamentul de revenire (regenerare) standard constă într-o încălzire de o oră la 400°C, urmată de 24 h la 80°C. După revenire, urmează răcirea cu viteză controlată până la temperatura ambiantă, viteza de răcire afectând regăsirea proprietăților dozimetrice inițiale.

Numărul atomic efectiv de 8,2, apropiat de cel al țesutului, regresia neglijabilă (5%/an la 20°C), ca și dependența unică a răspunsului de energia radiațiilor, sunt calități care îl fac utilizabil în domeniul dozimetriei clinice.

e) CaF₂:Dy (TLD-200)

CaF₂:Dy (TLD-200) Harshaw este unul dintre cei mai eficienți fosfori în conversia energiei fotonilor X și γ în semnal termoluminescent. Este de aproximativ 325 de ori mai sensibil decât LiF în domeniul energiilor utilizate în radiodiagnostic. Poate fi utilizat la măsurarea dozelor mici (0,1 μGy) din radiologie și din mediul ambiant. Curba sa de strălucire prezintă două maxime stabile la aproximativ 200°C și 240°C.

Emisia spectrală a TLD-200 prezintă două maxime la aproximativ 480 nm și 570 nm, prezentate în *figura 34*.

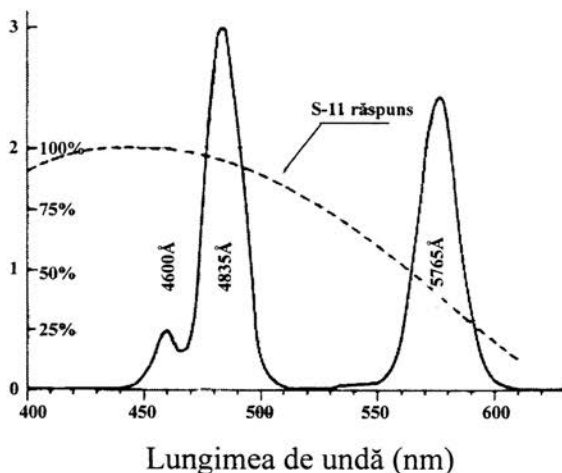


Fig. 34. Spectrul de termoluminescență pentru CaF₂ : Dy.

Fenomenul de regresie nu este pronunțat, constituind 6% în prima zi, dar stabilizându-se apoi la 10-12% pe lună.

Toate aceste avantaje coexistă, însă, cu un dezavantaj important: dependența puternică a răspunsului TL cu energia în domeniul energiilor sub 100 KeV, cu un maxim între 25-40 KeV.

Sensibilitatea acestui dozimetru este independentă de debitul dozei. Astfel, aplicând condițiile necesare pentru regresie și dependența de energie în domeniul energiilor radiațiilor X utilizate în imagistica medicală, el se dovedește a fi deosebit de util în măsurarea dozelor mici.

5. Aplicații ale dozimetriei termoluminescente

Sistemele de dozimetrie TL, cuprinzând dozimetrele propriu-zise și aparatele de citire asociate, se pot clasifica în trei mari grupe, după destinația lor: sisteme pentru utilizarea în cercetare, sisteme pentru dozimetria de rutină, în special clinică, precum și sisteme pentru dozimetria individuală de masă, pentru verificarea radioprotecției personalului expus profesional.

Pentru utilizarea în cercetare se realizează sisteme cu posibilități largi, la care se pot folosi mai mulți fosfori diferiți.

Sistemele pentru dozimetria de rutină sunt, de regulă, specializate pentru un anumit fosfor (ex.: LiF), precum și pentru un anumit tip sau câteva tipuri constructive de dozimetre.

Sistemele utilizate pentru dozimetria individuală pun accentul pe automatizare, reproductibilitate și productivitatea măsurării. Asociat cu aparatul

de citire, sistemul este și un subsistem de identificare, pe bază de cod, a persoanei purtătoare.

Principalele aplicații prezente ale dozimetriei TL rămân în domeniul dozimetriei clinice, unde se folosesc fosfori echivalenți cu țesutul, precum și în domeniul dozimetriei individuale în scop de radioprotecție.

Alte aplicații mai mult sau mai puțin corelate cu dozimetria propriu-zisă includ: dotarea obiectivelor de interes arheologic, influența iradierii asupra unor polimeri etc.

Termoluminescența fiind o metodă dozimetrică esențială relativă, operația de calibrare are o importanță deosebită. Ea se face prin comparare cu alte metode, considerate absolute, cum ar fi camerele de ionizare sau colorimetria.

În cazul specific al dozimetriei TL calibrarea capătă un rol și mai mare datorită următoarelor două fenomene: dependența răspunsului de particularitățile aparatului de citire utilizat și variațiile proprietăților fosforului chiar în cazul aceleiași șarje. De asemenea, repetarea frecventă a calibrării se impune în cazul fosforilor cu „memorie”, la care revenirea la condițiile inițiale după mai multe iradieri sau după o iradiere cu doză mare este dificilă.

5.7. Detectoare și semiconductoare

Dezvoltarea detectoarelor de radiații fabricate din cristale singulare de material semiconductor a revoluționat detectarea radiațiilor X și γ . Aceste dispozitive, care în prezent se găsesc în volume rezonabil de mari, au avantajul unei mari eficiențe de detecție înalte și al unei rezoluții energetice superioare. Sistemele de analiză puls-amplitudine (a amplitudinii pulsului), utilizând detectoare fabricate dintr-un singur cristal de siliciu (Si) sau germaniu (Ge), sunt utilizate extensiv la analiza radioelementelor.

Dezvoltarea detectoarelor de radiații cu semiconductoare s-a produs în paralel cu cea a detectoarelor de scintilație pentru detecție și măsurarea energiei particulelor încărcate și a fotonilor. M. Kay a raportat în 1951 detecția particulelor α cu diodă cu joncțiune semiconductoare. Aceasta a fost urmată de dezvoltarea contoarelor cu joncțiune, difuzată pentru măsurarea energiei particulelor încărcate.

Walter și Dabbs (1958) au obținut îmbunătățiri remarcabile în rezoluția energetică prin exploatarea joncțiunilor barieră-suprafață a Ge la temperaturile nitrogenului lichid. Totuși, atunci a fost posibilă numai colectarea purtătorilor de sarcină din straturi foarte subțiri de material și în consecință con-

toarele au avut o sensibilitate foarte limitată la energiile γ înalte. Pell (1960) a demonstrat că ionii de litiu (Li) ar putea fi difuzați în volume mari de Si sau Ge foarte pur pentru compensarea (a servi drept echivalent) impurităților reziduale de tip p, sporind astfel volumul regiunii de golire (epuizare). Cu această tehnică, ionii de Li pot fi folosiți la crearea structurii p-i-n ca în figura 35.

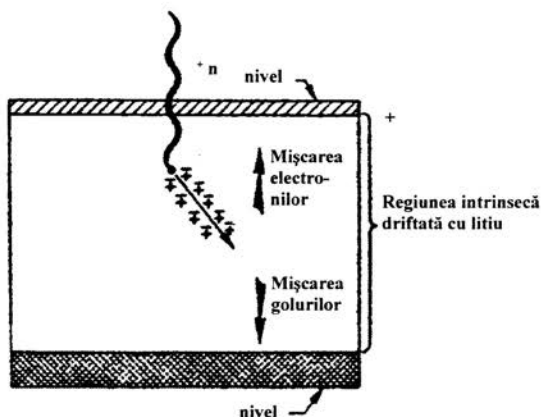


Fig. 35. Structura p-i-n a detectorului de Ge(Li).

Aceste dispozitive au proprietățile camerelor de ionizare cu corp solid. Dacă se aplică o tensiune detectorului, electronii care au fost ridicați înspre benzile de conducție ale materialului solid prin excitație sunt liberi să se miște și pot fi colectați la electrodul adecvat al dispozitivului. În cazul când dispozitivul este folosit ca detector de radiații γ , interacțiunea radiației γ în detector produce un electron excitat primar care la rândul lui excită o cascadă de electroni secundari în procedeul de disipare a energiei sale în volumul detectorului. În acest mod, energia electronului primar este consumată pentru producerea perechilor electron-gol care sunt apoi colectați. Numărul electronilor colectați va fi proporțional cu energia electronului primar și în consecință cu energia fotonului detectat.

Cristalele semiconductoare fără impurități sau defecte structurale (care pot acționa ca niște capcane pentru electronii secundari) pot fi utilizate direct în calitate de detectoare. În perioada timpurie de dezvoltare a acestor detectoare, în lipsa materialelor suficient de pure a apărut necesitatea compensării (a servi drept echivalent) impurităților prin driftarea (difuzia) ionilor de Li prin materialul detectorului la temperaturi înalte. Deoarece mobilitatea ionilor de Li în interiorul rețelei cristaline nu este neglijabilă la temperatura camerei, astfel de detectoare trebuie menținute la temperaturi criogenice pe toată durata lor de viață.

O descriere a primelor aplicații ale detectoarelor Ge(Li) pentru spectrometrie energetică γ este dată de Webb și Williams (1963). Din cauza dificultăților în obținerea materialelor semiconductoare cu suficientă puritate n-a fost posibilă realizarea colectării complete a sarcinilor la adâncimi depășind ~ 2 cm. Pentru depășirea acestei limite Ewans și Tanswdale (1963) au propus geometria coaxială. Acest tip de structură este înzestrat cu un volum sensibil mare, fiind pe larg folosit în fabricarea detectoarelor de Ge(Li) pentru spectrometrie gama energetică. Detectoarele de acest tip sunt disponibile (se găsesc) în volume de până la 100 cm^3 .

În prezent se produc cristale de Ge de o puritate suficientă pentru folosirea detectoarelor de calitate înaltă care nu necesită driftare de Li pentru compensarea acceptorilor reziduali. Detectoarele cu volum mare, planare sau coaxiale se produc în volum depășind 50 cm^3 . Astfel de detectoare, numite dispozitive „intrinsece”, au câteva avantaje. Deoarece mobilitatea ionilor de Li nu mai este o problemă, asemenea detectoare nu trebuie ținute la temperaturi criogenice tot timpul. Aceste dispozitive sunt mult mai stabile. Este stresant că aceste detectoare sunt operabile la temperaturi criogenice pentru reducerea zgomotului electric de natură termică. Atât detectorul, cât și preamplificatorul (tranzistorul cu efect de câmp FET) operează la $100\text{-}140^\circ\text{K}$ pentru obținerea unui raport optim semnal-zgomot.

1. Mecanismul conducției electrice în semiconductoare

Poate fi ușor înțeles și în modelul benzilor energetice. Deoarece electronii de pe păturile interne ale atomilor sunt puternic legați de nuclee, rezultă că în procesul de transport al sarcinilor vor juca un rol esențial numai ultimele benzi energetice, adică banda de valență, banda interzisă și banda de conducție. În prezentările grafice, pentru simplitate, sunt incluse numai nivelele care corespund marginii superioare a benzii de valență (E_v), lărgimea benzii interzise (E_g) și nivelul care corespunde marginii inferioare de conducție (E_c).

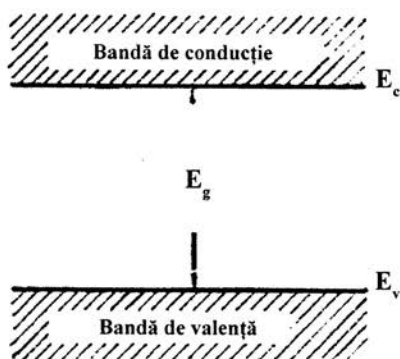


Fig. 36. Benzile energetice în semiconductoare.

Aducerea unui electron în starea de conducție nu înseamnă altceva decât trecerea electronului din banda de valență în banda de conducție (fig. 36). Dacă de la un nivel oarecare al benzii de valență a plecat un electron, atunci în locul nivelului ocupat apare un nivel energetic liber, vacant, sau un „gol”, termen care nu este tocmai adecvat. Acest gol este ocupat imediat de un oarecare electron vecin, cel mai apropiat, dar în locul din care a plecat acest electron se formează un nou gol, care, la rândul lui, va fi ocupat de un alt electron. Acest electron va lăsa și el în urma sa un gol etc.

Dacă semiconductorului i se aplică o diferență de potențial, atunci, sub influența câmpului electric, electronii din banda de valență vor începe să se deplaseze în sens invers câmpului electric. În cazul unei asemenea deplasări preferențiale a electronilor, golurile vor fi ocupate tocmai de acei electroni care se apropie de ele sub acțiunea câmpului. Însă acești electroni vor lăsa în urmă alte goluri care, de asemenea, vor fi ocupate cu electroni. În consecință, dacă unui semiconductor i se aplică o diferență de potențial, atunci electronii se vor deplasa de la polul negativ spre cel pozitiv, iar golurile – în sens invers (fig. 37).

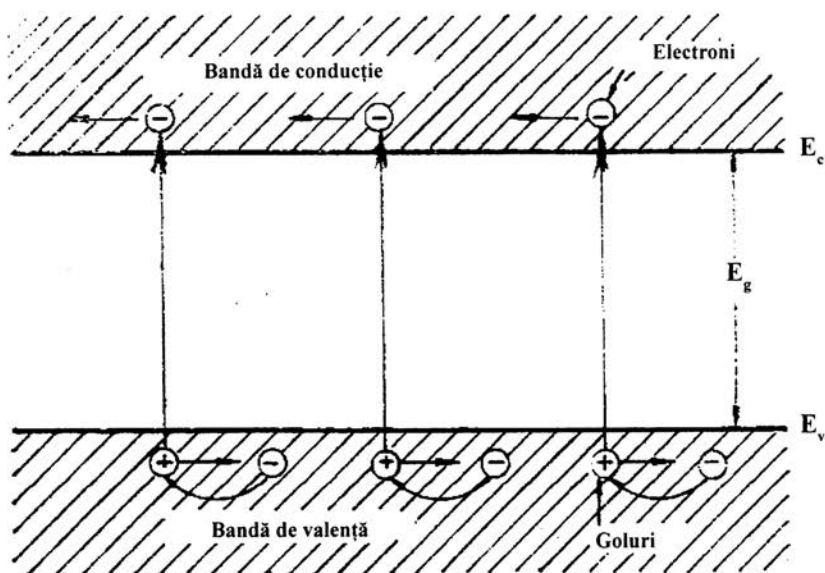


Fig. 37. Mișcarea electronilor și golurilor în benzile energetice.

În realitate, într-un semiconductor se vor deplasa numai electronii, dar în exterior mișcarea electronilor se va manifesta în mod diferit, în funcție de natura electronilor care vor participa la mișcarea dirijată sub acțiunea câmpului electric. Dacă curentul electric este realizat numai de electronii din banda de va-

lență, atunci mișcarea purtătorilor corespunde unei mișcări de sarcini pozitive, adică de goluri. În cazul în care curentul electric este determinat numai de electronii din banda de conducție, vom avea numai o mișcare de sarcină negativă.

În semiconductoare sunt posibile două tipuri de conducție electrică: **conducția electronică**, care este determinată de deplasarea electronilor din banda de conducție, și **conducția de goluri**, care este determinată de deplasarea golurilor din banda de valență. Când predomină un tip sau altul de conducție? La această întrebare vom răspunde în paragraful următor.

2. Impurități donoare și impurități acceptoare

În rețeaua cristalină a unui semiconductor întotdeauna există o anumită cantitate de impurități, adică de atomi ai unor elemente diferite de cele care formează rețeaua cristalină. De multe ori aceste impurități sunt introduse controlat, fie prin mecanismul difuziei, fie direct în procesul de creștere a monocristalelor. Impuritățile pot fi substituționale sau interstițiale. Cum se comportă din punct de vedere energetic electronii de pe ultima orbită a atomilor de impuritate în semiconductor este explicat în cele ce urmează.

Dacă concentrația impurităților nu este prea mare, atunci distanța dintre atomii impurităților va fi suficient de mare și aceștia nu vor interacționa între ei. Prin urmare, nivelele energetice ale electronilor vor rămâne în continuare discrete și nu se vor despica în benzi energetice. În funcție de natura atomilor de impuritate, nivelele energetice ale electronilor pot ocupa diferite poziții în raport cu benzile energetice ale semiconductorului. Din acest punct de vedere distingem două cazuri mai importante:

a) Impurități care dau nivele energetice mai apropiate de banda de conducție (fig. 38). Aceste impurități sunt numite *impurități donoare*, sau mai simplu – donori și se caracterizează prin faptul că electronii pot fi transferați ușor de pe un astfel de nivel în banda de conducție. Energia E_d de ionizare a nivelelor de donoare este în general mică, fiind cuprinsă între 0,01 și 0,2 eV.

b) Impurități care dau nivele energetice mai apropiate de banda de valență (fig. 38). Energia necesară pentru a transfera un electron de pe aceste nivele în banda de conducție este mare, în schimb ele pot primi mai ușor electroni din banda de valență. Din aceste motive nivelele menționate sunt numite *impurități acceptoare* sau mai simplu – acceptori. Electronii care au venit pe nivele acceptoare sunt electroni localizați și nu participă la actul conducției electrice. În schimb, golurile care s-au format în banda de valență se pot deplasa și deci vor participa la conducția electrică.

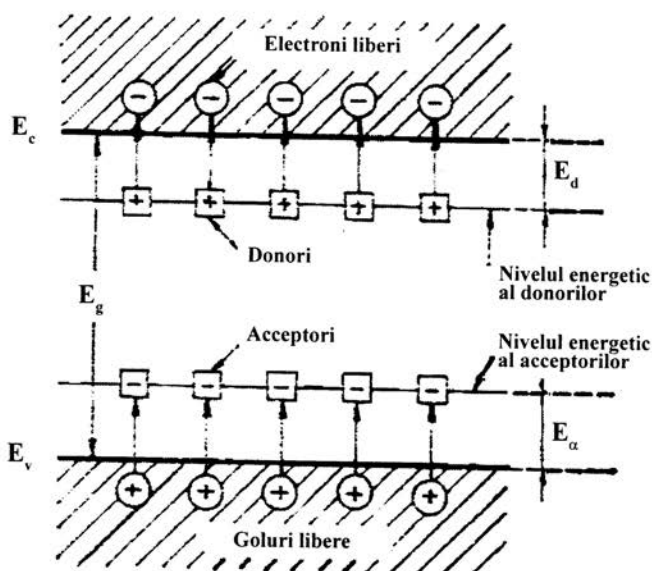


Fig. 38. Impurități donoare și acceptoare în semiconductoare.

În consecință, în semiconductoare cu impurități donoare conducția va fi determinată în principal de electroni și, din aceste motive, ei sunt numiți semiconductoare electronice sau de tip n. Dacă semiconductoarele conțin impurități acceptoare, atunci conducția va fi cauzată de golurile de bandă de valență fiind numite semiconductoare cu goluri sau semiconductoare de tip p. Literele n și p provin de la sarcina „negativă” a electronului și, respectiv, de la sarcina „pozitivă” a golului.

Dacă semiconductorul nu conține impurități, atunci la actul conducției electrice vor participa numai electronii excitați din banda de valență în banda de conducție și golurile care se formează în banda de valență. În acest caz avem numai o conducție proprie a semiconductorului și care poartă denumirea de **conducție intrinsecă**.

În fiecare semiconductor real, caracterul conducției este determinat, de fapt, de temperatura la care se află. În cazul unor temperaturi suficient de scăzute, conducția electrică este condiționată, în principal, de impurități, deoarece au energii mici de ionizare. Pe măsură ce se mărește temperatura, crește numărul de fluctuații capabile să transfere electroni din banda de valență în banda de conducție. În concluzie, la temperaturi suficient de înalte, când numărul acestor tranziții este mare, începe să predomine conducția proprie a semiconductorului, adică conducția intrinsecă.

3. Concentrația purtătorilor de sarcină

a) Semiconductoare intrinseci

Mișcarea termică a atomilor din nodurile rețelei cristaline se deosebește esențial de cea a atomilor din fază gazoasă. Astfel, într-un gaz atomii au o mișcare haotică în limitele volumului pe care îl ocupă, în timp ce în solid ei vor efectua numai o mișcare de oscilație în jurul pozițiilor de echilibru, datorită forțelor de legătură ce există între atomi. Tot datorită forțelor de legătură, mișcarea oscilatorie a fiecărui atom este transmisă celorlalți atomi pe direcția de acțiune a acestor forțe. Prin urmare, la o anumită temperatură T , când cristalul se află în echilibru termodinamic, atomii din nodurile rețelei cristaline vor oscila în jurul poziției de echilibru, iar acestui fenomen ondulatoriu i se pot asocia niște particule fictive, numite fononi (analog cu asocierea de fotoni ai unui câmp electromagnetic). În unitatea de volum a cristalelor există un număr foarte mare de particule ($\cong 10^{29} \text{ m}^{-3}$) și, din aceste motive, pentru a descrie unele fenomene fizice se pot aplica legile statisticii matematice. Nu toți atomii din nodurile rețelei cristaline au aceeași energie. Întotdeauna există un anumit număr de atomi a căror energie este mai mare decât energia cinetică medie,

$$E_m = \frac{3}{2} kT, \text{ unde } k \text{ este constanta lui Boltzman.}$$

Atomii care oscilează interacționează nu numai între ei, ci și cu electronii. Astfel, un atom care oscilează în jurul poziției de echilibru, în urma ciocnirii, poate transfera electronului o parte din energia sa. Ca urmare, energia electronului va crește și el poate trece de pe nivelul energetic pe care se află pe un alt nivel cu energie mai mare. Evident, această trecere (excitare) are loc dacă nivelul pe care urmează să-l ocupe este liber. Acest proces de interacțiune poartă denumirea de **excitare termică** a electronului.

Dacă temperatura rețelei cristaline este suficient de mare, atunci există o probabilitate finită:

$$P = \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

pentru a excita un electron din banda de valență în banda de conducție. În această formulă E_g reprezintă lărgimea benzii interzise. Numărul total al actelor de excitație ΔN_{ex} în unitatea de timp este proporțional cu numărul de electroni N_c de la marginea inferioară a benzii de conducție și cu probabilitatea de excitație, adică

$$\Delta N_{\text{ex}} = \beta_1 N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right),$$

unde β_1 este un coeficient de proporționalitate.

Pe de altă parte, are loc un proces invers actului de excitare și anume, recombinarea electronilor cu golurile. Într-adevăr, electronii liberi (excitați) care se deplasează în cristal vor întâlni goluri, adică stări libere în banda de valență, cu care se pot recombina. Actul recombinării nu înseamnă altceva decât trecerea electronului de pe nivelul excitat din banda de conducție pe un nivel liber din banda de valență și este însoțit de dispariția unui electron și a unui gol. Numărul actelor de recombinare ΔN_{rec} în intervalul de timp Δt trebuie să fie proporțional cu concentrația electronilor n , respectiv a golurilor p , adică:

$$\Delta N_{\text{rec}} = \beta_2 np = \beta_2 n^2,$$

deoarece în cazul semiconductorului $n = p$. În această relație β_2 este un coeficient de proporționalitate. Dacă semiconductorul se află un timp suficient de mare la temperatura T , atunci numărul actelor de excitare devine egal cu numărul actelor de recombinare, adică $\Delta N_{\text{rec}} = \Delta N_{\text{ex}}$ și, ținând seama de relațiile de mai sus, pentru concentrațiile purtătorilor de sarcină obținem:

$$n_i = p_i = \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2} N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right),$$

unde indicele i arată că este vorba de un semiconductor intrinsec. După cum era de așteptat, această relație arată că într-un semiconductor intrinsec concentrația de echilibru a purtătorilor de sarcină este determinată de lărgimea benzii interzise la care se află semiconductorul. Un calcul mai riguros pentru concentrațiile electronilor și golurilor într-un semiconductor intrinsec dă următoarea expresie:

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{2\pi \sqrt{m_n m_p} kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right),$$

unde m_n și m_p sunt masele efective ale electronilor și golurilor, iar k este constanta lui Planck. Ce sunt masele efective ale electronilor și golurilor? Mai sus noi am utilizat frecvent expresiile „electroni liberi” și „goluri libere” în cristal. În realitate purtătorii de sarcină dintr-un cristal nu sunt chiar „liberi”, deoarece ei se mișcă într-un câmp potențial periodic. Dacă un electron liber din exteriorul cristalului se află în câmpul electric E , atunci asupra lui va acționa o forță $\vec{F} = -e\vec{E}$ care va imprima accelerația:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_0},$$

unde m_0 este masa electronului liber.

Pentru electronul care se află în cristal formula (5) nu mai este valabilă, deoarece asupra electronului, pe lângă forța $\vec{F} = -e\vec{E}$, determinată de câmpul electric aplicat, mai acționează și forțele provocate de câmpul periodic intern. Prin urmare, mișcarea electronului în cristal este mai complexă decât cea a unui electron liber din exteriorul cristalului. În general, pentru electronii din banda de conducție, prin analogie cu mecanica clasică, se scrie că accelerația este proporțională cu forța, adică,

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_n},$$

unde coeficientul m_n are semnificația de masă și poartă denumirea de masă efectivă a electronului. În mod analog pentru accelerația golurilor se scrie relația:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_p},$$

unde coeficientul m_p poartă denumirea de masă efectivă a golurilor.

b) Semiconductoare de tip n

Dacă N_d este concentrația donozilor dintr-un semiconductor și dacă E_d este energia de ionizare a donozilor, atunci concentrația se poate exprima sub forma:

$$N = A_d \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right),$$

unde A_d este o constantă care depinde de temperatură, masa efectivă a electronilor și concentrația donozilor. Raționamentul pentru obținerea acestei formule este similar cu cel din cazul semiconductoarelor intrinsece. Un calcul mai riguros al formulei dă următoarea expresie pentru concentrația electronilor într-un semiconductor cu donori:

$$n = \sqrt{2N_d} \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right)$$

c) Semiconductoare de tip p

Dacă notăm cu N_a concentrația acceptozilor din semiconductor și cu E_a – energia lor de ionizare, atunci pentru concentrația golurilor, prin analogie cu formula precedentă, putem scrie expresia:

$$p = \sqrt{2N_a} \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right)$$

În cazul unui semiconductor electronic, odată cu creșterea temperaturii vor trece tot mai mulți electroni de pe nivelele donozare în banda de conduc-

ție până în momentul în care toți donorii sunt ionizați. La fel se comportă și acceptorii. Concentrația electronilor într-un semiconductor cu donori, în condiții de epuizare, este egală practic cu concentrația donurilor:

$$n \cong N_d$$

În mod analog, pentru un semiconductor cu acceptori în condițiile de epuizare vom avea:

$$p \cong N_a$$

La temperaturi coborâte concentrația electronilor este determinată în principal de electronii excitați de pe nivelele donoare și crește cu temperatura exponențial, conform relației de mai sus. La o anumită temperatură T_e practic toți donorii sunt ionizați (are loc fenomenul de epuizare). Dacă temperatura crește în continuare, la o anumită temperatură T_i încep procesele de excitare termică a electronilor din banda de valență în banda de conducție și concentrația electronilor din banda de conducție rezultă din relația:

$$n = n_i \wedge N_d,$$

iar dacă $n \gg N_d$, atunci semiconductorul cu donori trece în regim de conducție intrinsecă. În domeniul de temperaturi cuprinse între T_e și T_i concentrația electronilor în banda de conducție este practic constantă, iar conducția semiconductorului se află în domeniul de epuizare. Iată că odată cu creșterea temperaturii semiconductorul poate trece de la conducția de impurități la regimul de epuizare și apoi la conducția intrinsecă (fig. 39).

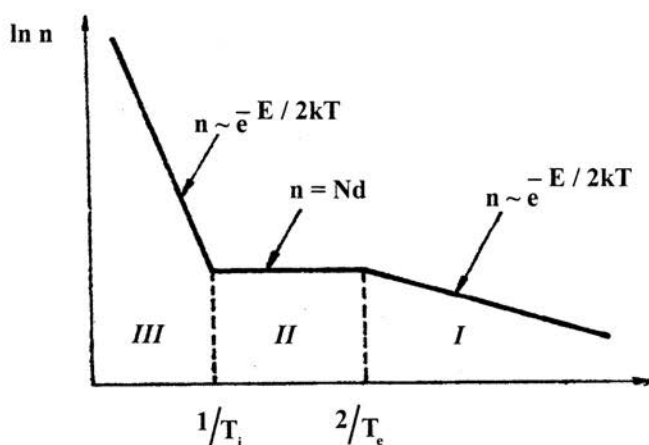


Fig. 39. Concentrația electronilor în funcție de temperatură.

Să presupunem în continuare că într-un semiconductor s-au introdus uniform atât acceptori, cât și donori cu concentrațiile N_a și, respectiv, N_d , care la o anumită temperatură T sunt complet ionizați. Întrucât înainte de introducerea impurităților semiconductorul era neutru din punct de vedere electric, rezultă că el va fi neutru și după impurificare. Concentrația sarcinilor pozitive din vecinătatea unui punct din interiorul semiconductorului este $p \wedge N_d$, iar a celor negative $-n \wedge N_a$ și astfel condiția de neutralitate se poate scrie sub forma:

$$n \wedge N_a = p \wedge N_d$$

Această relație este utilă atunci când se urmărește determinarea concentrațiilor electronilor și golurilor într-un semiconductor atât cu impurități donoare, cât și acceptoare.

4. Transportul purtătorilor de sarcină în semiconductoare

În absența câmpului electric, electronii și golurile libere care se află într-un semiconductor vor avea o mișcare termică dezordonată la fel ca în cazul moleculelor unui gaz ideal. Sub acțiunea unui câmp electric E , electronii din banda de conducție vor avea accelerația $a_n = \frac{eE}{m_n}$, iar în intervalul de timp t_n viteza lor va crește cu cantitatea $v_v = a_n t_n$. Dacă mărimea t_n nu ar fi limitată de nimic, atunci viteza electronilor ar crește neconținut. Teoretic se poate demonstra că în cristalele ideale, fără defecte structurale și cu atomii fixați rigid, electronii se pot mișca în câmpul periodic al rețelei cristaline în intervalele de timp t_n foarte mici. Cristale ideale în realitate nu există. În cristalele reale potențialul periodic al rețelei cristaline este perturbat în primul rând de oscilațiile atomilor din nodurile rețelei cristaline, iar în al doilea rând – de o serie de defecte structurale (vacanțe, interstițiali, fanoni, dislocații etc). Din aceste motive, electronul va avea o mișcare accelerată pe o distanță l_n relativ mică, după care în urma ciocnirii cu fononii (oscilațiile rețelei) sau a defectelor structurale își schimbă mărimea și direcția vitezei. Distanța l_n parcursă de electron între două ciocniri poartă denumirea de drum liber mijlociu, iar intervalul de timp în t_n în care este parcursă această distanță poartă denumirea de timp liber mijlociu sau de timp de relaxare. Prin urmare, viteza electronului pe direcția câmpului va crește în timpul t_n cu mărimea:

$$v_n = -\frac{et_n}{m_n} E.$$

Această relație se mai poate scrie sub forma:

$$v_n = -\mu_n E,$$

unde mărimea

$$\mu_n = \frac{et_n}{m_n}$$

poartă denumirea de mobilitate a electronilor și se definește ca viteza pe care o capătă electronii în unitatea de câmp electric. În SI mobilitatea se măsoară în m^2/Vs .

Mișcarea orientată a electronilor pe direcția câmpului electric poartă denumirea de mișcare de **drift**, iar viteza lor medie pe direcția câmpului se numește **viteză de drift**.

Pentru goluri, în mod analog, se pot defini mărimi similare. Astfel, viteza de drift a golurilor va fi dată de relația:

$$v_p = \mu_p E, \text{ unde } \mu_p = \frac{et_p}{m_p}$$

este mobilitatea golurilor, iar t_p este timpul de relaxare.

Cunoscând viteza de drift a electronilor, putem calcula ușor intensitatea curentului și conductivitatea unui semiconductor de tip n. În acest scop presupunem că avem o probă de semiconductor cu secțiunea S și lungimea L, căreia i se aplică diferența de potențial U. De-a lungul probei vom avea câmpul electric $E = U / L$. Ținând cont de formula ($v_n = -\mu_n E$) de mai sus și dacă n este concentrația electronilor liberi, atunci intervalul de timp, prin Δt secțiunea S a probei, va trece sarcina:

$$\Delta Q_n = S (-en) v_n \Delta t = en \mu_n S \Delta t E.$$

Prin definiție, intensitatea curentului este dată de relația:

$$j_n = \frac{\Delta Q_n}{S \Delta t}$$

Din ultimele două relații, pentru intensitatea curentului, obținem expresia:

$$j_n = en\mu_n E = \sigma_n E,$$

unde

$$\sigma_n E = en\mu_n$$

reprezintă conductivitatea electrică a unui semiconductor electric. Introducând mobilitatea în expresia conductivității, obținem:

$$\sigma_n = \frac{e^2 t_n}{m_n} n$$

După cum se observă din această formulă, conductivitatea semiconductoarelor este determinată atât de concentrația purtătorilor de sarcină, cât și de mobilitatea lor. De regulă, mobilitățile depind puțin de temperatură și întrucât concentrațiile purtătorilor de sarcină sunt puternic afectate de temperatura din semiconductoare rezultă că și conducția electrică a semiconductoarelor va depinde de temperatură, și atunci obținem

$$\sigma_n = \sigma_{no} \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right),$$

unde σ_{no} este o constantă care depinde puțin de temperatură.

Prin raționamente similare, rezultatele de mai sus pot fi ușor extinse și la semiconductoare, în care la conducția electrică participă atât electronii, cât și golurile. Astfel, pentru un semiconductor de tip p, conductivitatea electrică se poate exprima prin relația:

$$\sigma_p = ep\mu_p = \sigma_{po} \exp\left(-\frac{E_p}{2kT}\right)$$

Dacă la procesul conducției electrice participă două tipuri de purtători de sarcină, atunci conductivitatea globală a semiconductoarelor este egală cu suma conductivităților de electroni și, respectiv, de goluri, adică

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

În cazul unui semiconductor intrinsec $n = p = n_i$ și putem scrie

$$\sigma_i = \sigma_{io} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \text{ unde}$$

$$\sigma_{io} = 2e(\mu_n + \mu_p) \left(\frac{2\pi\sqrt{m_n m_p} kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

Din această formulă remarcăm dependența puternică de temperatura conductivității semiconductorului intrinsec.

5. Parametrii materialelor semiconductoare

Din punctul de vedere al proprietăților electronice, materialele semiconductoare, după cum rezultă din cele menționate mai sus, pot fi caracterizate cu ajutorul unor parametri ce vizează de la un semiconductor la altul și depind de temperatura la care se află acesta. Parametrii sunt determinați experimental, fiind utilizați la proiectarea dispozitivelor semiconductoare. Cei mai impor-

tanți parametri ai unui semiconductor sunt lărgimea benzii interzise (E_g) și mobilitățile purtătorilor de sarcină (μ_n și μ_p).

În *tabelul 9* sunt date lărgimile benzilor interzise și mobilitățile purtătorilor de sarcină în cazul de sarcină a câtorva materiale semiconductoare, la $T = 300$ K.

Tabelul 9

Caracteristicile semiconductoarelor

Semiconductor	E_g (eV)	μ_n (cm ² /V.s)	μ_p (cm ² /V.s)
Ge	0,67	3800	1800
Si	1,1	1300	500
GaAs	1,4	7000	400
CdTe	1,5	1200	50
CdS	2,4	350	15

6. Proprietățile caracteristice ale detectoarelor cu semiconductoare

Pentru detectarea radiațiilor ionizante poate fi folosită, în mod analog cu ionizarea gazului în camera de ionizare, generarea purtătorilor de sarcină liberi în solide. Pentru aceasta este necesar de a îndeplini unele condiții importante. Astfel, timpul de viață al purtătorilor de sarcină, adică intervalul mediu de timp între generarea și recombinarea sau captura lor în capcane, trebuie să fie mai mare decât timpul de colectare. Timpii de colectare scurți presupun o mare mobilitate de sarcină și un câmp de colectare intens. În pofida intensității mari de câmp, în detectoare este preferabil să nu existe curent de bază, adică mediul de numărare trebuie să fie izolator. În sfârșit, se recomandă ca energia W necesară pentru generarea unei perechi de purtători de sarcină să fie mică, pentru a se obține o amplitudine mare a semnalului și o rezoluție îmbunătățită. O joncțiune semiconductoare *p-n* polarizată invers reprezintă un dispozitiv cu corp solid cu astfel de caracteristici.

Situația într-o joncțiune *p-n* polarizată invers este extrem de nesimetrică. Semiconductoarele de tip *n* subțire cu concentrație foarte mare de donori servesc ca fereastră de intrare pentru radiații, regiunea de tip *p* fiind doar puțin dopată. Difuzia purtătorilor de sarcină în stratul de baraj produce o distribuție de sarcină spațială $\rho(x)$ cu o creștere liniară a intensității câmpului $F(x)$ și un

potențial parabolic $\Phi(x)$. Tensiunea inversă externă U_s , crescută cu așa-numita tensiune de difuzie U_d (de circa 0,3V la Ge și aproape 0,6V la Si), apare ca diferență de potențial între regiunile de tip n și tip p . Fiindcă nici un gol liber nu poate fi eliberat din regiunea n , nu există curent în stratul de baraj fără o generare de purtători din exterior. Deci, purtătorii de sarcină (electroni și goluri) produși în stratul de baraj de către particulele ionizante, sunt colectați de către câmpul $F(x)$ și formează curentul de semnal în același mod ca în camera de ionizare.

Datorită formei parabolice a lui $\Phi(x)$, lărgimea l a stratului de baraj:

$$l = \frac{\epsilon}{2\pi e N_p} \sqrt{U_s + U_d}$$

este proporțională cu rădăcina pătrată din $U_s + U_d$. În ecuația prezentată ϵ este constanta dielectrică a semiconductorului și N_p – concentrația acceptorilor în regiunea de tip p . Capacitatea C_d a stratului de baraj este invers proporțională cu l .

$$C_d \cong \frac{eN_p}{2} S \frac{1}{\sqrt{U_s + U_d}}$$

C_d , depinzând astfel de tensiunea inversă $U_s \times S$, reprezintă suprafața joncțiunii. Intensitatea maximă a câmpului $F(0)$ este:

$$F(0) = 2 \frac{U_s + U_d}{l}$$

Figura 40 descrie corect situația în detectorul cu așa-numitele semiconductoare de tip cu difuzie sau în detectoarele cu baraj de suprafață. Valoarea tensiunii de lucru U_s variază între 10 și 1000 V, iar stratul de baraj are o grosime de circa 1 mm pentru tensiunile cele mai mari. Un detector cu suprafața de 2 cm² va avea o capacitate de detecție C_d de ordinul 10 la 100 pF.

Straturi de detecție mai adânci cu intensități de câmp aproximativ constante pot fi obținute prin introducerea unei regiuni intrinseci între cele două regiuni puternic dopate de tip p și tip n (*fig. 40*). Această structură este numită detector de tip **p-i-n**.

Sarcinile spațiale sunt localizate în regiunile puternic dopate n și p .

Lărgimea l a stratului de baraj este practic independentă de tensiunea de polarizare U_s , iar intensitatea câmpului (*fig. 41*) în regiunea l este aproape constantă și egală cu:

$$F(x) = \frac{U_s + U_d}{l}$$

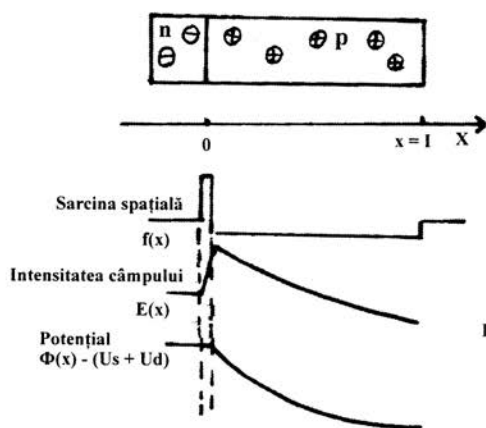


Fig. 40. Tensiunea de polarizare.

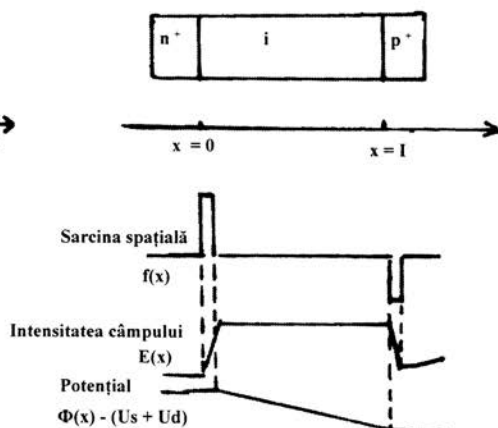


Fig. 41. Intensitatea câmpului.

Detectoarele cu strat de baraj de circa 10-12 mm pot fi confecționate prin folosirea metodei de driftare de ioni. Aceasta implică compensarea concentrației acceptoare într-o regiune inițial dopată p moderat, prin ioni de litiu într-o regiune intermediară a rețelei-gazdă. Detectoarele cu germaniu și siliciu driftați cu litiu au o utilizare largă în spectroscopia radiațiilor nucleare. Datorită lărgimii l mari a stratului de baraj, capacitatea C_d a unor astfel de detectoare, chiar cu suprafețe mari, de ordinul a 5 cm^2 este de doar circa 10 pF.

Curentul de scurgere I_d al unui detector cu semiconductor constă, în principal, din componentele curentului de difuzie, curentului de volum și ale curentului de suprafață. Fiindcă lărgimea l a stratului de baraj este mult mai mare decât lungimea de difuzie, curentul de difuzie poate fi neglijat în comparație cu curentul de volum I_{dv} . Un detector cu siliciu driftat cu litiu cu $S = 2 \text{ cm}^2$ și $l = 5 \text{ cm}$ la temperatura camerei are $I_{dv} = 1 \mu\text{A}$. Recent s-au realizat detectoare Ge (Li) având $S = 80 \text{ cm}^2$, funcționând la temperaturi de -180°C și având $I_{dv} < 10^{-10} \text{ A}$.

7. Energia necesară pentru a forma o pereche electron-gol

Energia ΔE pierdută într-un semiconductor de către o particulă ionizantă este divizată între excitarea vibrațiilor rețelei și producerea electronilor și golurilor libere. Energia vibrației rețelei este cuantizată, cuanta de energie E_r (energia fonilor) fiind dată de către frecvența Raman a rețelei, care corespunde la aproximativ 50 MeV. În conformitate cu teoria Shockley, energia medie W

necesară pentru a forma o pereche electron-gol poate fi exprimată ca o funcție de lărgimea energiei de separare între două benzi ale semiconductorului E_g :

$$w = 2,2 E_g + nE_r$$

Prin n s-a notat numărul mediu al fononilor produși de ciocnirea ionizantă, care este de ordinul $10 \div 100$. Fiindcă pentru a forma o pereche de purtător de sarcină este necesară cel puțin energia E_g , randamentul procesului de ionizare este:

$$\eta = \frac{E_g}{W} = \frac{1}{2,2 + n \frac{E_r}{E_g}}$$

Deviația statistică σ_N a numărului $N = \frac{\Delta E}{W}$ a perechii electron-gol, produsă de către particule cu energie ΔE oprită complet în semiconductor, este dată de

$$\sigma_N = \sqrt{f N}$$

exact ca pentru gazul ionizat. Factorul Fano $f \leq 1$ descrie diminuarea variației datorită corelației dintre evenimentele de ionizare particulare și în consecință datorită pierderii totale de energie dată ΔE .

În *figura 42* este reprezentată variația factorului Fano și a randamentului η în funcție de numărul de fononi n .

Rezultă că rezoluția pentru energia particulelor scăzută este determinată de către zgomotul detectorului și preamplificatorului.

8. Forma pulsului în detectoarele p-n și p-i-n

În detectoarele cu semiconductoare, în afară de mișcarea termică haotică a electronilor și golurilor, există o mișcare adițională a purtătorilor de sarcină în direcția intensității câmpului $F(x)$, ale căror viteze:

$$W_n = -\mu_n F(x)$$

$$W_p = \mu_p F(x) \tag{30}$$

sunt proporționale cu $F(x)$, μ_n și μ_p fiind mobilitățile electronilor și respectiv ale golurilor.

În *figura 43* sunt reprezentate formele pulsurilor de curent $I_n(t)$ și $I_p(t)$, timpii de colectare T_n și T_p , și formele pulsurilor de tensiune integrate $U_n(t)$ și $U_p(t)$ ale componentelor de electroni, și respectiv golurile pentru detectoarele

pn și pin. Calculul formei pulsurilor se bazează pe presupunerea că evenimentul de ionizare este punctual, are loc la $x = x_0$ și $t = 0$ și produce o sarcină totală de $\pm Q$.

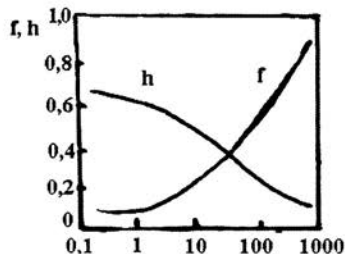


Fig. 42. Variația factorului Fano.

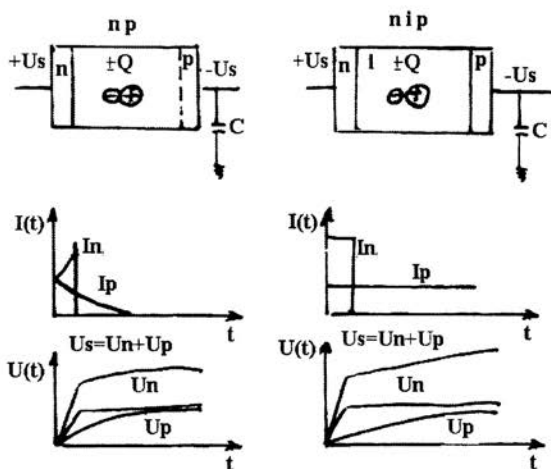


Fig. 43. Formele pulsurilor de curent.

Ținând seama de definiția mobilității purtătorilor de sarcină în gaze și în semiconductoare, formele de pulsuri pentru detectorul pin corespund complet cu cele ale unei camere de ionizare în plan paralel. Deoarece $\mu_n \geq \mu_p$ în detectoarele cu semiconductoare, ambii purtători de sarcini influențează forma pulsului. Datorită câmpului neomogen în joncțiunile pn difuzate sau în detectoarele cu baraj de suprafață, pulsurile pn se aseamănă, în linii mari, cu situația dintr-o cameră de ionizare cilindrică.

Timpii de creștere ai pulsurilor de tensiune în detectoarele subțiri ($1 \sim 1 \text{ mm}$) sunt de ordinul a 1 ns . În detectoarele driftate cu litiu ($1 \sim 1 \text{ mm}$) timpii de creștere sunt de ordinul a 100 ns . Folosind un discriminator al formei de puls, pot fi identificate diferite specii de particule.

Din punct de vedere constructiv joncțiunea p-n se poate realiza prin difuzie sau sub forma așa-numitului strat de baraj la suprafață. În ambele cazuri, grosimea d a regiunii de sarcină spațială – care constituie volumul sensibil al detectorului – este direct proporțională cu rădăcina pătrată din produsul dintre rezistivitatea materialului de bază ρ și tensiunea inversă aplicată U :

$$d = k \sqrt{\rho U}, \quad (31)$$

constanta de proporționalitate k fiind diferită pentru semiconductorul de bază de tip p față de cea pentru tipul n.

În cazul joncțiunii difuzate se pornește de la un monocristal de Si de tip p, la suprafața căruia se difuzează un strat foarte subțire de fosfor, realizându-se o joncțiune n⁺p apropiată de suprafață după cum se arată în figura 44. Notăția n⁺ indică existența unui dopaj puternic (cu p) în regiunea n pentru ca regiunea de sarcină spațială să se extindă, mai ales în zona de tip p a joncțiunii.

Suprafața de intrare a detectorului este partea n⁺ care, pentru a nu împiedica particulele încărcate să pătrundă în zona activă, se realizează la grosimi extrem de mici (de ordinul unui micron). Tensiunea de polarizare se aplică pe fețele opuse ale joncțiunii prin contacte electrice. Contactul pe suprafața puternic dopată este simplu de realizat, întrucât această suprafață are rezistivitatea apropiată de cea a conductoarelor, în timp ce contactul din regiunea p, de mare rezistivitate, necesită precauții speciale, deoarece există pericolul apariției unei joncțiuni suplimentare care ar înrăutăți mult proprietățile detectorului.

Suprafața utilă a detectorului este de ordinul a 1 cm². Deci, acest tip de detector are dimensiuni mici.

În mod obișnuit, grosimea regiunii sensibile a detectorului cu joncțiune difuzată este de ordinul 0,6 mm la o tensiune inversă de 500 V, ceea ce permite să se detecteze particule α cu energii până la 40 MeV.

Pentru a îmbunătăți performanțele și, în special, pentru a diminua zgomotul de fond produs de curenții de scurgere superficiali, s-au produs detectoare cu inel de gardă. Din punct de vedere constructiv, la aceste detectoare în suprafața de tip n se taie un șanț circular suficient de adânc pentru a pătrunde în stratul sărăcit, care izolează electric marginile detectorului de zona sa centrală. Zona periferică, a inelului de gardă, se conectează la tensiunea de polarizare. În felul acesta, semnalul este cules numai din zona centrală, iar curenții superficiali sunt înlăturați, diminuându-se în mod sensibil zgomotul de fond (fig. 44).

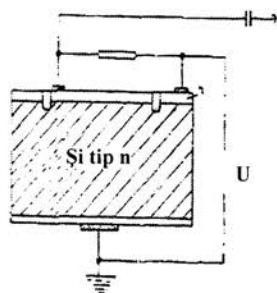
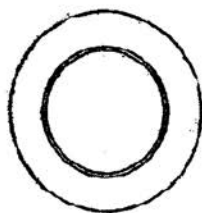
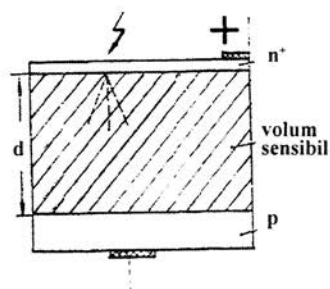


Fig. 44. Detector cu joncțiune difuzată.

Fig. 45. Tensiunea de polarizare.

În această variantă constructivă se pot aplica tensiuni mai mari, obținându-se grosimi utile de ordinul a 1 mm, potrivite pentru detecția electronilor cu energii în jurul a 1-1,5 MeV.

9. Detectoarele cu strat de baraj la suprafață au o construcție simplă și din acest motiv sunt răspândite. Joncțiunea este realizată prin simpla expunere în aer a unui monocristal de tip n de mare rezistivitate (1000-10000 Ω cm). Stratul de oxid care se formează are proprietăți de tip p⁺. O peliculă subțire de aur depusă prin vid constituie contactul electric pe suprafața frontală, iar pe fața opusă se realizează un contact ohmic. Așadar, aceasta se obține din joncțiunea reprezentată în *figura 45*, care relevă substituirea lui n cu p și p cu n și, ca rezultat, se inversează polaritățile tensiunii aplicate.

Un tip special de detector cu joncțiune este **detectorul subțire**, având grosimi de 0,05-0,5 mm, la care regiunea de sarcină spațială este extinsă pe tot volumul. O particulă încărcată care îl traversează pierde numai o parte din energia sa, proporțională cu puterea de oprire. De aceea detectoarele menționate se numesc de tip dW/dx, tocmai pentru că permit să se obțină un semnal proporțional cu puterea de oprire (dW/dx). Realizarea unei grosimi mici cu uniformitate mare, precum și a contactului ohmic suficient de bun, sunt principalele dificultăți întâmpinate la construirea acestui tip de detector. Detectoarele dW/dx pot fi expuse pe ambele fețe la particulele încărcate. Ele sunt utilizate împreună cu detectoarele cu gaz cu semiconductoare, pentru a determina energia totală în sisteme de identificare a particulelor grele (protoni, deuteroni, ³He și particule α) încărcate cu energii medii – produsul dintre W și dW/dx fiind proporțional cu masa particulei.

În afară de detectoarele dW/dx, trebuie remarcate și detectoarele sensibile la poziție, care permit măsurarea simultană a energiei și poziției particulelor încărcate.

Deosebiri constructive față de un detector obișnuit constau în faptul că, în loc de forma de disc, se utilizează o formă paralelipipedică, iar în loc de un singur contact ohmic masiv, pe una din suprafețe există două contacte situate la extremități (un contact ohmic și electrodul de colectare a semnalului de poziție). Amplitudinea impulsului de poziție este cu atât mai mare, cu cât ionizările produse de particula încărcată au loc mai aproape de electrodul de poziție. Acest tip de detector este utilizat ca înlocuitor al plăcilor fotografice în spectrorafele de masă.

Spre deosebire de particulele încărcate, care își pierd energia în porții mici, deci într-un număr foarte mare de ciocniri cu atomii substanței, cuantele

de radiații electromagnetice (γ sau X) își cedează energia, producând electroni, în procese unice. Procesele au o probabilitate de producere mai mică decât unitatea. Doar că nu toate cuantele care trec prin volumul sensibil al detectorului sunt înregistrate. Fiecare detector are o anumită eficacitate de detecție pentru cuantele de energie dată, eficacitate care indică ce procent din numărul total de cuante care străbat detectorul va fi înregistrat. Această eficacitate este proporțională cu volumul detectorului și depinde foarte mult de numărul atomic Z al materialului din care este construit detectorul. Din acest motiv, pentru radiația γ sunt necesare detectoare de volum mare și se preferă Ge, care are $Z = 32$ față de Si, care are $Z = 14$, cu toate că folosirea Ge este însoțită de dificultăți mari, datorită necesității de a fi menținut continuu la temperatura azotului lichid. Volumul mare se obține printr-o tehnică de compensare a impurităților acceptoare dintr-un monocristal de Ge de tip p, cu impurități de donoare de litiu. Aceste detectoare se numesc de tip **n-i-p** sau Ge (Li), adică din Ge driftat cu Li. Denumirea provine din existența unei regiuni de tip intrinsec (i), cu rezistivitate extrem de mare, între o regiune de tip p a materialului de bază și o regiune îngustă de tip n⁺ obținută prin difuzia inițială.

Detectoarele Ge (Li) se realizează în două variante consecutive și coaxiale (vezi *fig. 46*). După cum se vede, la aceeași înălțime de driftare (d), limitată din considerente tehnologice la cca 1 cm, detectoarele coaxiale permit să se obțină volume mai mari. Astfel, au fost produse detectoare cu volume a peste 100 cm².

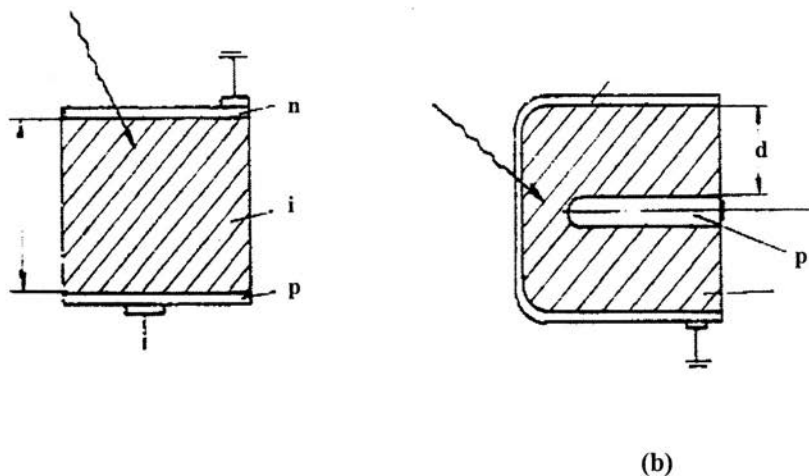


Fig. 46. Detectoare de tip p-i-n.

Principalele avantaje ale detectoarelor cu semiconductoare față de detectoarele cu descărcare în gaze și scintilatoare sunt: rezoluția energetică mai înaltă, buna liniaritate într-o mare gamă de energii, timpul de colectare foarte mic, precum și dimensiunile mici. Aceste avantaje sunt determinate de necesitatea unei aparaturi electronice asociate, mai pretențioase și de complicația răcirii cu azot lichid în cazul detectoarelor de Ge (Li).

10. Rezoluția energetică a detectoarelor

După cum s-a indicat anterior, aplicația majoră a acestor detectoare este spectrometria energetică γ și X. Dezvoltarea amplificatorilor cu puls de zgomot scăzut, care utilizează tranzistori cu efect de câmp ce operează în domeniul nitrogen N lichid, a determinat obținerea rezoluțiilor energetice care se apropie de limitele statistice impuse de varianța în numărul perechilor electron-gol create în detector.

Lărgimea observată experimental a liniei electronului monoenergetic rezultat din interacțiunea radiației γ în regiunea intrinsecă a detectorului semiconductor este determinată de un număr de factori. Cei mai importanți dintre aceștia sunt:

- variația numărului de perechi electron-gol;
- contribuția zgomotului din detector, cum ar fi curentul de scurgere datorat problemelor de colectare a sarcinilor;
- contribuția zgomotului electronic la intrarea în sistemul de amplificare a pulsului;
- performanța rețelei de filtre pentru formarea pulsului în sistemul de amplificare de pulsuri;
- acuratețea convertorului analogic-digital utilizat la măsurarea amplitudinii pulsului detectorului și
- stabilitatea sistemului electronic.

Limitarea de bază în rezoluție este impusă de variațiile în producerea perechilor de purtători de sarcină în detector Ge. Pentru producerea unei perechi gol-electron în medie este necesară o energie egală cu 2,98 eV. Aceasta se poate compara cu 30 eV necesari pentru producerea unei perechi de ioni în majoritatea contoarelor proporționale cu gaz. Ca urmare a producerii unui electron cu energie înaltă în detector, energia acestuia este cheltuită la producerea perechilor electron-gol sau în procese ce dau naștere vibrațiilor rețelei (în special ramura optică).

Deoarece împărțirea energiei între aceste 2 moduri competitive este de natură statistică, trebuie să ne referim la un număr mediu de perechi electron-

gol rezultate din pierderea unei cantități date de energie în detector. Se obișnuiește să se exprime rezoluția experimentală a unui detector în următoarea manieră:

$$R = 2,355 (F E_{\gamma} E_p)^{1/2},$$

unde R este lărgimea măsurată a fotopicului (în keV) la jumătatea amplitudinii sub maxime (Full Width at Half Maximum, FWHM), E_{γ} – energia radiației γ în KeV, E_p – energia medie necesară creării unei perechi electron-gol, – așa-numitul factor Fono, legat de cantitatea fracțională a energiei totale absorbite, care are ca rezultat producerea perechilor electron-gol și care ilustrează performanța detectorilor semiconductori. *Figura 47* prezintă rezoluția măsurată în funcție de energia fotonului pentru un detector Ge(Li) modern folosit în spectrometrie gama. La capătul domeniului de energie joasă rezoluția este limitată de performanța de zgomot al sistemului electronic. La energii înalte rezoluția poate fi alterată de problemele de colectare a sarcinii în detectoare și de instabilitățile sistemelor electronice.

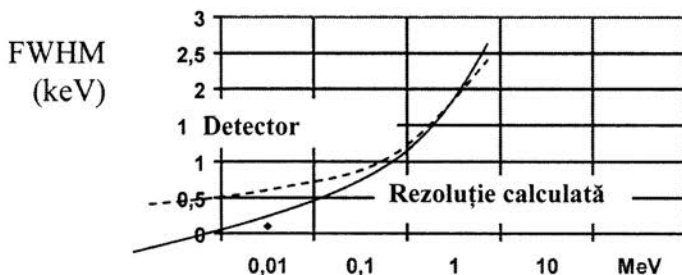


Fig. 47. Rezoluția măsurată în funcție de energia fotonului.

11. Eficiența detectoarelor semiconductoare

În măsurarea cantitativă a radiațiilor gama cu detectoare semiconductoare, o deosebită importanță are eficiența lor. Aceasta se determină experimental cu un set de surse de referință, având rate de emisie gama cunoscute cu precizie.

Se folosesc mai multe definiții pentru eficiență.

a) Eficiența absolută

Este raportul numărului de pulsuri produse în detector la numărul de fotoni sau particule produse de sursă. Se ia în considerare unghiul solid acoperit de detector și care depinde de distanța sursă-detector.

b) Eficiența intrinsecă

Este raportul numărului de pulsuri produse în detector față de fotoni sau particule încărcate care lovesc detectorul. Acest raport este dependent de puterea de stopare pentru particulele încărcate, fiind, în general, unitar atunci când grosimea detectorului este bine aleasă. Pentru radiații γ eficiența intrinsecă depinde de coeficientul de atenuare a radiației incidente și de grosimea detectorului.

c) Eficiența pe picul de absorbție totală sau pe „fotopic”

Este eficiența de producere a pulsurilor numai pe picul de absorbție totală a fotonului incident fără să se țină seama de celelalte pulsuri (ex. datorate efectului Compton). Această eficiență este 1 pentru particulele încărcate. Pentru radiațiile ionizante de energii mai mici de câțiva MeV, eficiența pe fotopic este dependentă în principal de raportul picurilor produse prin efect fotoelectric față de cel prin efect Compton pentru materialul detectorului. Pentru aceeași grosime a detectorului, eficiența pe fotopic este mai mare pentru detectorul din material cu Z mai mare.

12. Aplicații ale detectoarelor semiconductoare

Cea mai performantă tehnică de măsurare, utilizată în analizele de nivel scăzut, este spectrometria radiației γ folosind detectoare cu semiconductoare. Majoritatea sistemelor folosesc detectoare de Ge(Li) și GeHP care au eficiențe de măsurare de ordinul 1 până la 25% mai mari decât NaI(Tl) 7,6 x 7,6 cm pentru radiația γ de 1,3 MeV.

În cazul radiației gama cu energii cuprinse între aproximativ 100 keV și 10 MeV pot fi considerate toate efectele interacțiunii dintre fotoni și materie: pe lângă efectele fotoelectric și Compton, împrăștierea Rayleigh și formarea de perechi.

În cazul efectului fotoelectric, electronul secundar ia întreaga energie a fotonului incident minus energia sa de legătură în atom.

$$E_{el} = E_0 - E_B$$

E_{el} = energia cinetică a electronului ejectat

E_0 = energia fotonului incident

E_B = energia de legătură a electronului

Atomul excitat se dezexcită prin emiterea unui electron Auger (care își va pierde energia în detector) sau prin radiații X, care vor fi, de asemenea, absorbite în detector cu probabilitate mare. În final, este produs un pic în analizorul multicanal (AMC), corespunzător întregii energii a fotonului.

Dacă radiația X scapă din volumul detectorului, va apărea un al doilea pic în AMC, având energia $E_0 - E_K$.

Într-un eveniment Compton, energia totală a fotonului incident este împărțită între electronul secundar și fotonul Compton; electronul secundar, a cărui energie poate varia de la zero la o valoare maximă dată de:

$$E_{\max} = E_0 - E_0 / 1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2},$$

va fi cu siguranță detectat, fotonul Compton poate scăpa din detector. În acest caz, distribuția continuă Compton va apărea de la zero la energia maximă, numită margine Compton.

Numai în cazul unei noi interacțiuni fotoelectrice secundare a fotonului Compton acesta va avea contribuție la picul de absorbție totală.

În cazul fotonilor cu energii înalte ($E \gg 1022 \text{ keV}$) situația este și mai complicată, datorită producerii de perechi și posibilei scăpări a unuia sau a celor 2 fotoni de 511 keV. Din aceste motive, pentru o energie gama E_0 (totală) primii fotoni vor apărea în spectru la E_0 (întreaga energie), la $E_0 - 511 \text{ keV}$ și $E_0 - 1022 \text{ keV}$. În plus, Comptonul continuu și picurile Compton ale tuturor acestor picuri sunt prezentate în figura 48.

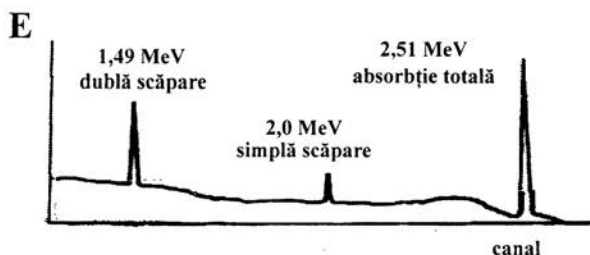


Fig. 48. Exemplu tipic de spectru gama.

În final trebuie remarcat că radiația emisă de sursă poate interacționa, pe lângă materialul detectorului, cu materialul de colimare a sursei, cu materialul de ecranare, cu aerul etc., dând naștere la picuri false, care trebuie luate în considerare, mai ales la măsurarea nivelelor foarte joase de radiații.

13. Metoda de analiză gama spectrometrică cu detectoare de Ge(Li)

Spectrul radiațiilor gama reprezintă distribuția după energii a radiațiilor gama, obținută printr-o serie de măsurători și înregistrări, numită *spectrometru gama*.

Spectrele obținute cu detectoare de Ge(Li) diferă de cele obținute cu detectoare cu scintilație. În primul rând, rezoluția energetică este mult crescută,

astfel că fotopicurile individuale sunt, de obicei, rezolvate, motiv ce simplifică semnificativ interpretarea spectrelor. Informația esențială privind energia și intensitatea radiației γ este reprezentată de poziția și mărimea fotopicurilor individuale. O secțiune a unui spectru complex de radiații γ obținut cu detectorul Ge(Li) este prezentată în *figura 49*, în care radiațiile γ individuale apar ca picuri având lărgime și înălțime finite, suprapuse peste un fond variabil ușor.

Cu o aproximație generală analiza spectrală reprezintă picurile dintr-un spectru prin funcția Gaussiană $y(x)$, conform relației:

$$y(x) = y_0 - (x - x_0)^2 / b_0,$$

unde x este numărul canalului, x_0 – punctul central al picului, b_0 – lărgimea picului și y_0 – maximul picului. Folosind metoda celor mai mici pătrate, datele punctuale din regiunea picului pot fi approximate cu o distribuție gaussiană combinată și o linie dreaptă sau altă formă de funcție (fondul continuu), determinând astfel cea mai probabilă localizare a picului pe axa orizontală care să reprezinte energia radiației γ , iar aria de sub pic – intensitatea radiației.

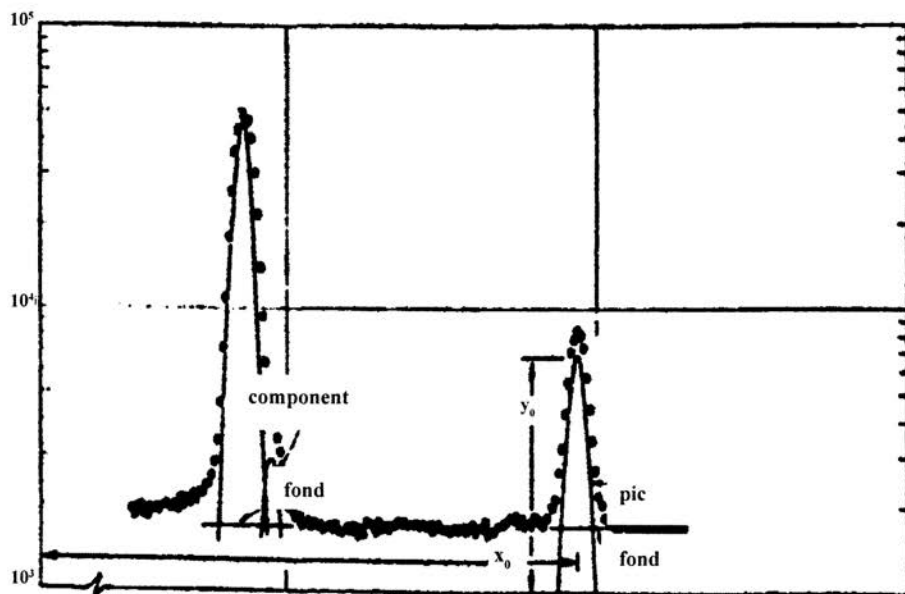


Fig. 49. Segment de spectru gama cu Ge(Li).

În *figură 49* sunt prezentate 2 cazuri. Primul pic ilustrează o pereche nerezolvată, al doilea pic indică parametrii esențiali utilizați în analiza spectrului pentru a obține localizarea picului, lățimea și aria lui.

În dreapta figurii este prezentat un singur pic cu toate mărimile experimentale definite. O funcție gaussiană și o linie dreaptă continuă (fondul) s-au ajustat la punctele experimentale.

În partea stângă este prezentată o situație mai complexă. În acest caz picul are două componente nesoluționate. Cea mai reușită reprezentare a acestei regiuni a spectrului ar fi două funcții Gauss plus un continuu sub nivel. Pentru realizarea acestei aproximări prin procedeul celor mai mici pătrate este necesar de a se recurge la „regresia neliniară”. Această tehnică este suficient de sofisticată și necesită un computer.

Aproximarea unui foticpic cu o distribuție gaussiană permite localizarea canalului picului din spectrul multicanal pentru fotonul de interes. Totuși, este necesar să se extragă din „banca” de spectre rata emisiei și energiei fiecărui foton, apoi să se recurgă la identificarea radionuclidului din sursa care a generat spectrul observat. Pentru a obține această informație este necesar să se efectueze următoarele operații:

1) Localizarea pozițiilor mediane ale picurilor în distribuția după înălțimea pulsului prin aproximarea cu o distribuție gaussiană, descrisă mai sus.

2) Stabilirea unei scale precise de energie vs. numărul canalului prin tehnici specifice de calibrare.

3) Determinarea energiei fotonilor observați în spectru după înălțimea pulsului din informațiile obținute în primele 2 trepte.

4) Determinarea ariei (intensitatea) picurilor în chestiune după extragerea fondului.

5) Compararea energiilor calculate ale picurilor cu lista de energii ale radiațiilor γ pentru identificarea radionuclizilor, a căror fotoni au fost detectați în spectru.

6) Determinarea concentrației fiecărui radionuclid, prezent în proba din ariile picurilor, prin tehnici de calibrare corespunzătoare.

Problema esențială implicată în măsurarea energiei radiației γ cu spectrometre Ge(Li) este stabilirea unei scale precise de energie în raport cu înălțimea pulsului. Pentru aceasta este necesar de a măsura cu exactitate liniaritatea sistemului de analiză a înălțimii pulsului până la 0,01 din canal pentru a permite interpolarea. În acest scop, se folosesc surse radioactive care emit fotoni de energii cunoscute cu acuratețe și se identifică numărul de canal al picului corespunzător fiecărei energii fotonice.

Având calibrat întregul sistem spectrometric pentru neliniaritatea răspunsului la energia depozitată în detector, calibrarea în energie a sistemului

pentru o creștere aleasă se efectuează expunând detectorul la fotonul emis de sursele de referință cu energii fotonice cunoscute cu acuratețe. Sistemul spectrometric poate fi folosit la măsurarea energiilor și intensităților într-un larg domeniu energetic.

În cazul când este necesar de a efectua măsurători mai precise ale energiei unei linii spectrale necunoscute, se aplică o tehnică de interpolare (fig.50).

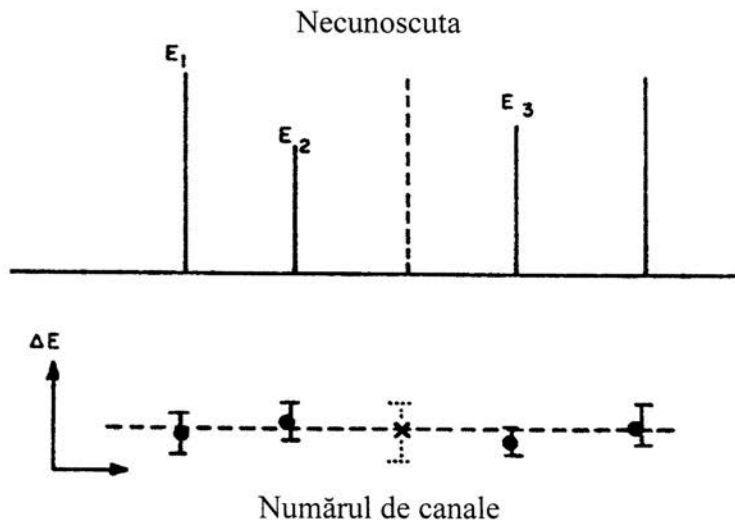


Fig. 50. Ilustrarea măsurării energiei gama prin comparare simultană cu *standarde de referință*.

ΔE este deviația energiei de referință de la funcția de aproximație.

În această tehnică, linia necunoscută este înregistrată simultan cu câteva linii cu energii puțin mai mari și puțin mai mici, dar bine cunoscute. Energia necunoscută poate fi determinată ca în figura 50, iar curba de calibrare poate fi folosită apoi pentru regiunea de interes și pentru o interpolare mai bună.

5.8. Detectoare cu scintilație

Un detector cu scintilație se compune dintr-un scintilator și dintr-un fotomultiplicator. La iradiere, în scintilator se produc fotoni luminoși (scintilație), care sunt preluați de scintilator și convertiți în impulsuri electrice. Scintilatoarele sunt cristale, lichide sau gaze cu atomi sau molecule excitabile de către radiațiile absorbite. Dezexcitarea acestora are loc după un timp foarte scurt (10^{-8} s), prin emiterea unei lumini vizibile sau ultraviolete, caracteristice scintilatorului, numită *fluorescență*.

Cristalele de NaI activate sunt actualmente scintilatoarele cel mai frecvent utilizate la detectarea radiațiilor γ . Ele au o bună capacitate de rezoluție și o mare sensibilitate pentru radiațiile de acest gen.

Contoarele cu scintilație pot fi utilizate și pentru detectarea radiațiilor β , cristalele scintilatoare fiind confecționate în aceste cazuri din compuși organici. Tot pentru detectarea radiațiilor β se utilizează „scintilatoare plastice”, sub forma unui cilindru de material plastic (polistiren cu adaosuri de antracen, terfenil, polivinil-toluen, polimetacrilat de metil etc., în care s-au încorporat substanțe fluorescente ca tetrafenil-butadiena). Scintilatoarele plastice posedă o stabilitate la radiații mai mare decât cristalele organice și pot fi folosite la măsurarea unor debite foarte mari de radiații.

Pentru detectarea radiațiilor β moi (produse marcate cu ^3H , ^{14}C), se utilizează scintilatoare lichide. În aceste cazuri, produsul radioactiv se încorporează chiar în mediul scintilant.

Condiția fundamentală pentru ca un scintilator să fie utilizat ca detector de radiații este ca el să fie eficient la absorbția energiei particulei care îl străbate, să asigure totodată o convertire cât mai bună a energiei particulei incidente în energia luminoasă și să fie transparent față de radiația proprie de scintilație.

Caracteristicile principale ale unui scintilator sunt: eficacitatea de conversie, spectrul de fluorescență, constanta de timp și temperatura de lucru.

Eficacitatea de conversie reprezintă raportul dintre energia emisă de scintilator și energia particulei sau fotonului incident. Ea depinde de natura și de energia radiației incidente și variază de la câteva procente la zeci de procente.

Spectrul de fluorescență diferă de natura scintilatorului, putând avea maximum de intensitate la diferite lungimi de undă. De exemplu, un cristal de NaI(Tl) are maximum de intensitate de fluorescență la 140-430 μm . Este important ca acest maxim să fie cât mai apropiat de maximum spectrului de sensibilitate al fotomultiplicatorului.

Constanta de timp reprezintă intervalul de timp în care intensitatea fluorescenței scade de e ori față de intensitatea maximă. Acest timp variază de la 10^{-6} la 10^{-9} s.

Temperatura de lucru este importantă, deoarece influențează emisia de fotoni de către scintilatorul excitat. La un cristal de NaI(Tl) s-a observat că o variație de temperatură între 0 și 270°C micșorează amplitudinea radiației de fluorescență cu un coeficient de 0,12% pentru fiecare centigrad.

1. Tipuri de cristale scintilatoare

Scintilatoarele pot fi de natură anorganică sau organică. Dintre scintilatoarele anorganice, cele mai utilizate sunt cele de NaI(Tl), CsI(Tl) și ZnS(Ag).

NaI(Tl) poate fi obținută sub formă de monocristale de dimensiuni mari, transparente pentru radiațiile luminoase și cu o constantă de timp de circa 10^{-7} s. Are însă dezavantajul că este higroscopică și își pierde transparența. Din această cauză, cristalul este acoperit cu un strat de ulei protector, montat într-o carcasă din aluminiu gros de 0,6-0,7 mm, ermetic închisă, având pe o parte o fereastră din sticlă transparentă pentru trecerea scintilațiilor luminoase la fotocatodul multiplicatorului. Între cristal și protecția de aluminiu se află un strat reflector de oxid de magneziu. De obicei, cristalele de NaI(Tl) au o formă cilindrică, dimensiunile respective variind în funcție de necesități.

Pentru mărirea eficacității, cristalele pot fi prevăzute în centru cu un cilindru, în care se introduce proba solidă sau lichidă. Cu un astfel de cristal se poate asigura o geometrie de măsurare de $\approx 4\pi$ și care, din această cauză, este adecvată pentru detectarea surselor γ de joasă energie cu intensitate slabă.

Deoarece iodul are numărul atomic relativ mare ($Z=53$) și prezintă o mare probabilitate de interacțiune cu radiațiile prin efect fotoelectric, cristalele de NaI sunt adecvate pentru detectarea radiațiilor γ și X. Eficiența acestor cristale este de ordinul a 50-100%. Pentru detectarea radiațiilor γ moi sau a radiațiilor X se utilizează cristale subțiri cu fereastra de intrare din aluminiu cu o grosime de 0,005-0,025 cm sau din beriliu cu o grosime de 0,02 cm.

Cristalele subțiri, sub 1 mm, sunt utilizate pentru detectarea particulelor grele ionizante.

Radiațiile γ cu energii mai mari de 0,6 MeV pot fi detectate și ele cu cristale de NaI(Tl), dar cu o eficiență mult mai mică.

Cristalele de CsI(Tl) se utilizează mai ales pentru detectarea radiațiilor β și a protonilor. Ele au avantajul că nu sunt higroscopice.

În ultimul timp s-au produs și alte scintilatoare anorganice, ca CsI (Na), CaI_2 , $\text{CaI}_2(\text{Eu})$. Astfel de scintilatoare au unele avantaje față de cristalul de NaI(Tl) ca, de exemplu, timpul de scintilație mai redus și o eficiență mai mare la detectarea radiațiilor X etc.

Sulfura de zinc, activată de obicei cu argint, sub formă de pulbere fină, se depune în strat subțire (circa $5\text{mg}/\text{cm}^2$) pe un disc de material plastic transparent sau din sticlă. Scintilatorul poate fi acoperit cu o foiță de aluminiu având un strat de 0,7-0,8 mg/cm^2 . Foița are rolul de a opri pătrunderea radiațiilor luminoase la cristal, favorizând deci posibilitatea de detectare la

lumina zilei. Deoarece foița de aluminiu absoarbe o parte din radiațiile α , deci micșorează sensibilitatea metodei de detectare, se recomandă ca grosimea ei să fie cât mai mică.

Scintilatorul cu ZnS(Ag) este adecvat pentru măsurarea radiațiilor α și a particulelor încărcate. Eficacitatea conversiei pentru astfel de particule poate atinge 30%, dar timpul de scintilație este mare, de circa $2-5 \times 10^6$ s. Pentru radiațiile X și γ , scintilatoarele pe bază de sulfură de zinc au o eficacitate foarte mică.

Lumina este emisă de un scintilator după o lege exponențială de tip:

$$L(t) = L_0 \exp(-t/\tau_f),$$

unde τ_f reprezintă constanta de fluorescență a procesului, care este dependentă de tipul de particulă ionizantă.

2. Detectarea scintilației

În figura 51 se arată formarea pulsului de curent care cuprinde cristalul fluorescent (fosforul) și fotomultiplicatorul. La intrarea particulei în cristal are loc absorbția ei; dăra groasă din figură reprezintă urma particulei până la oprirea ei completă. Această dăra devine sediul cuantelor de lumină care emerg în toate direcțiile.

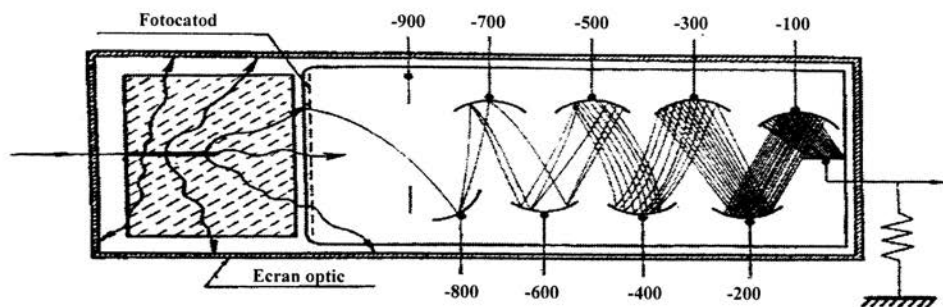


Fig. 51. Schema formării pulsului într-un detector cu scintilație format din scintilator și fotomultiplicator.

Unele cuante ajung la fotocatodul fotomultiplicatorului, din care scot fototelectroni. Randamentul conversiunii foton-electron este, în general, destul de mic (aproximativ 10%). Fototelectronii eliberați din fotocatod sunt accelerați către prima dinodă. Datorită coeficientului de emisie secundară ridicat al suprafeței dinodei, un electron incident poate elibera la impactul cu suprafața dinodei mai mulți electroni secundari; coeficientul de emisie secundară poate atinge valoarea 5. Electronii sunt multiplicați în acest mod și

anodul culege o sarcină electrică sub forma unui puls de curent. Prin urmare, unei particule incidente îi corespunde un plus de curent la ieșirea fotomultiplicatorului. Timpul de multiplicare al electronilor în fotomultiplicator nu depășește timpul de stingere al scintilației în fosfor. Amplitudinea pulsului la ieșirea fotomultiplicatorului depinde de tensiunea aplicată dinodului.

Curentul anodic este dependent de constanta de fluorescență și de timpul de tranzit t_p al electronilor prin fotomultiplicator (fig. 52).

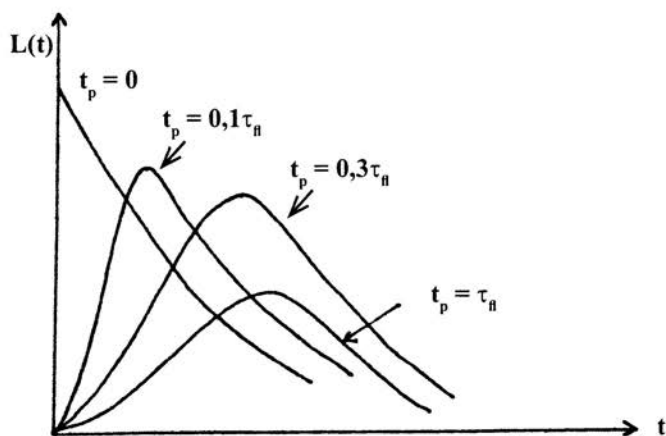


Fig. 52. Curentul anodic în funcție de constanta fluorescență pentru scintilator cu fotomultiplicatorul adecvat.

Mai mult ca atât, pentru un timp de tranzit constant, curentul este în funcție de tipul de particulă incidentă V (fig. 53).

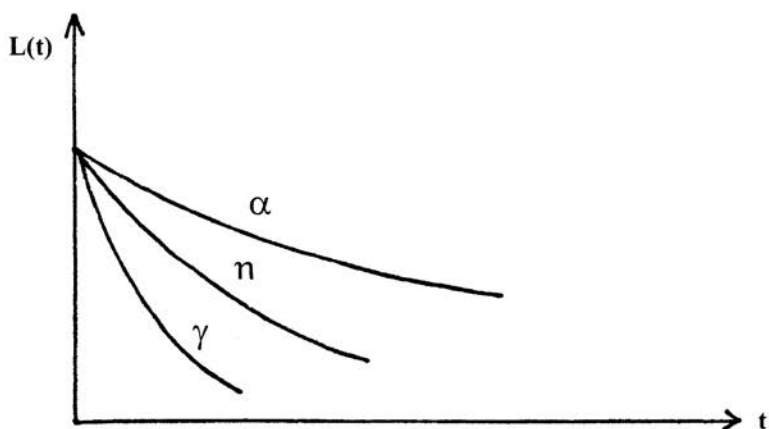


Fig. 53. Curentul anodic față de tipul de particulă incidentă pentru un scintilator cu fotomultiplicatorul adecvat.

Din acest punct de vedere, este avantajos să se folosească o tensiune cât mai mare. Dar pe măsură ce tensiunea crește, se mărește și zgomotul de fond al fotomultiplicatorului.

Zgomotul de fond reprezintă în pulsurile colectate de anodul fotomultiplicatorului în lipsa cristalului un ecran optic, oprind lumina să cadă pe fotocatod. Aceste pulsuri, de amplitudine mai mică, se datoresc fie electronilor care părăsesc catodul prin emisie termică sau prin emisia datorită câmpului electric, fie descărcărilor electrice care apar între dinode acolo unde sunt vârfuri. Emisia termică poate fi redusă introducând fotomultiplicatorul în zăpada carbonică sau în azot lichid; celelalte cauze se elimină prin alegerea tuburilor, dar cea mai eficace este metoda de aplicare pe dinode a tensiunilor foarte mari.

Aplicații: măsurarea concentrației de radon.

Detectarea radonului din aer se bazează pe înregistrarea scintilațiilor produse de particulele alfa emise în scintilatorul de ZnS (Ag).

Detectorul este format din scintilator și un fotomultiplicator adecvat. Schema-bloc a unui astfel de dispozitiv este prezentată mai jos (fig. 54).

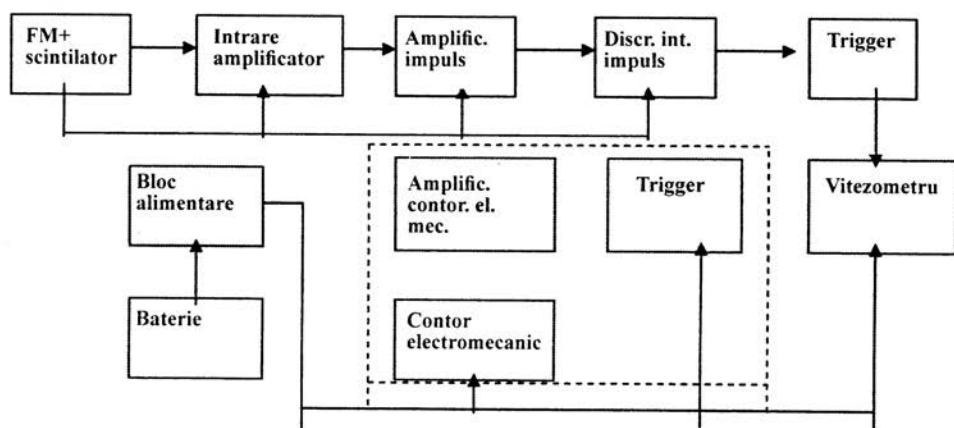


Fig. 54. Schema-bloc a emanometrului „Radon”.

Pe un disc de sticlă se depune pulbere microcristalină de ZnS (Ag) într-un strat de $5 \times 10^{-3} \text{ g / cm}^2$. Fluorescența emisă se situează în intervalul lungimilor de undă cuprins între 400-450 nm.

Partea II.

EFECTELE BIOLOGICE ALE RADIAȚIILOR IONIZANTE

Сұйықтар 6.

EFECTELE BIOLOGICE ALE RADIAȚIILOR IONIZANTE

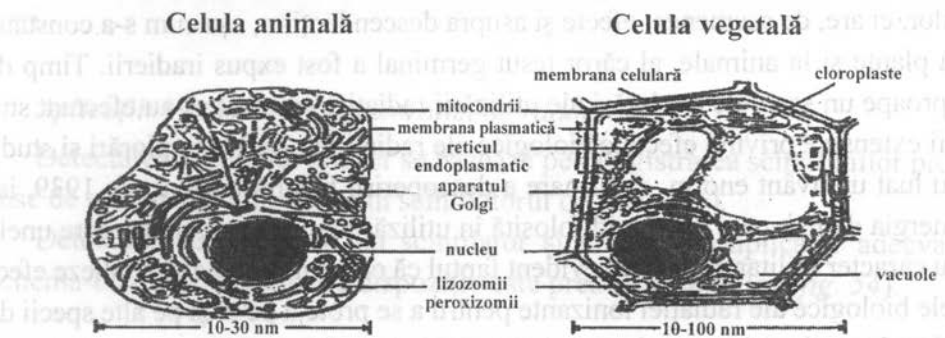
6.1. Efectele biologice primare ale radiațiilor ionizante

La scurt timp după descoperirea razelor X, în 1895, și a radioactivității naturale, în 1896, date clinice, provenite mai ales de la efectele asupra pielii, au indicat faptul că radiația ionizantă este dăunătoare pentru țesuturile umane. Ulterior s-a realizat că radiația ionizantă afectează nu numai majoritatea țesuturilor, ci are, de asemenea, efecte și asupra descendenților, așa cum s-a constatat la plante și la animale, al căror țesut germinal a fost expus iradierii. Timp de aproape un secol de explorări ale utilizării radiației ionizante s-au efectuat studii extensive privind efectele biologice ale radiațiilor. Aceste explorări și studii au luat un avânt enorm, ca urmare a descoperirii fisiunii nucleare în 1939, iar energia de fisiune a fost rapid folosită în utilizările ulterioare, dintre care unele cu caracter militar. A devenit evident faptul că oamenii trebuie să studieze efectele biologice ale radiației ionizante pentru a se proteja pe ei și pe alte specii de efectele nocive ale acesteia, totodată maximalizând avantajele utilizării ei.

Studii diverse, în multe laboratoare din întreaga lume, deși incomplete, au condus la o bogăție de material informațional referitor la efectele biologice ale radiației, care posibil este mai mare decât cel asociat cu oricare alt pericol din mediul ambiant. Radiațiile ionizante sunt radiații capabile să provoace ionizarea atomilor din orice mediu pe care îl pot străbate. Ele sunt compuse fie din particule încărcate (particule *alfa*, particule *beta*) cu viteze mari, ce pot fi emise de radionuclizi, fie din particule încărcate ce pot apărea secundar atunci când radiații indirect ionizante, așa ca razele X (generate artificial), razele *gamma* (rezultate din tranziții nucleare) sau neutronii, le expulzează din atomii mediului. Aceste particule secundare încărcate (în mod obișnuit, electroni sau protoni) produc ionizări și excitații ulterioare la fel ca și particulele primare încărcate. Procesele prin care fotonii (raze X și raze *gamma*) ejectează electroni din atomi includ efectul fotoelectric, efectul Compton și producerea de perechi. Contribuțiile relative ale acestor procese depind de energia fotonilor și de proprietățile mediului pe care îl traversează. Aceste procese, ca și cele prin care neutronii ejectează protoni și alte particule din nuclee producând reculul acestora, sunt bine documentate.

6.2. Structura celulară

Toate ființele vii sunt alcătuite din celule, fiecare celulă, la rândul ei, este constituită dintr-o membrană și citoplasmă, care conține substanțe chimice și organite ce îndeplinesc următoarele funcții: mitocondriile au funcția energetică, ribozomii au funcția de a sintetiza proteinele, aparatul Golgi are funcția de secreție, reticulul endoplasmatic produce secrețiile, lizozomii reprezintă aparatul digestiv al celulei. Cele mai simple forme de viață sunt celulele procariote. Organismele superioare (celule eucariote, *fig.55*) sunt asemănătoare unei uzine, în cadrul căreia grupurile de celule îndeplinesc funcții specializate și comunică prin sisteme complexe.



Sistemul membranelor celulare

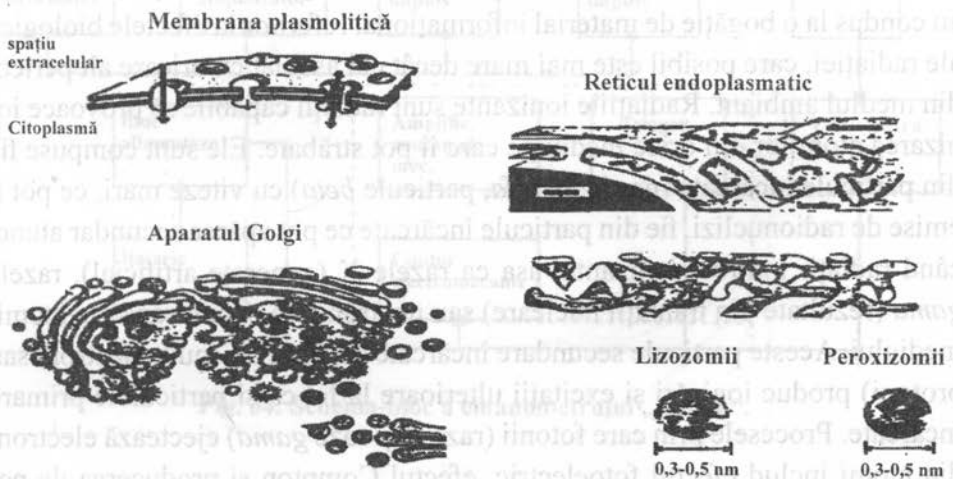


Fig. 55. Celula eucariotă, organitele celulei.

Celulele eucariote conțin mai multă informație genetică față de celulele procariote. O celulă umană, de exemplu, conține de o mie de ori mai mult ADN ca *E. coli*. O altă diferență importantă între celulele procariote și celule-

le eucariote constă în faptul că ADN-ul organismelor superioare este asociat proteinelor bazice, numite *histone*. Cromozomii celulelor eucariote sunt înconjurați de membrana nucleară, spre deosebire de celulele procariote, care sunt lipsite de aceasta. Transcripția și translația informației genetice la celulele eucariote sunt separate în spațiu și în timp, pe când la celulele procariote ele sunt strâns asociate și cuplate.

Nucleul reprezintă materialul genetic celular, „centrul” coordonator al celulei și evoluează concomitent cu evoluția lumii organice, suferind un proces continuu de organizare și perfecționare. În funcție de modul și gradul de organizare a materialului genetic, organismele celulare se împart în două grupuri mari: procariote și eucariote.

Nucleul celulelor eucariote. A fost descoperit de R. Brown (1831) în celulele orhideelor, iar ulterior a fost descris și în celulele animale. Majoritatea celulelor conțin un singur nucleu localizat central sau lateral, dar se întâlnesc celule bi- și polinucleare. Există, de asemenea, și celule lipsite de nucleu, cum ar fi eritrocitele mature ale mamiferelor. Nucleul are, de regulă, formă sferică sau ovoidală.

Ultrastructura. Nucleul este format din: membrană nucleară care delimitează conținutul nuclear intern de citoplasmă, cromatină, nucleol și suc nuclear (carioplasma).

Membrana nucleară. Prezența membranei nucleare constituie una din trăsăturile esențiale prin care celulele eucariote se deosebesc de cele procariote. Membrana nucleară este tristratificată: membrana externă, membrana internă și spațiul perinuclear ce le separă. Membranele au o structură similară cu cea a membranei elementare. Membrana nucleară externă delimitează nucleul la exterior, contactând nemijlocit cu citoplasma, este perforată de pori, prin care are loc schimbul de substanțe între nucleu și mediul citoplasmei, numărul porilor fiind direct proporțional cu activitatea fiziologică a celulei. Membrana nucleară internă, de asemenea, nu este continuă, fiind perforată de pori, iar suprafața ei internă este acoperită cu un strat dens de cromatină.

Cromatina este o substanță cu structură fibrilară formată din molecule de ADN asociate cu histone (proteine de suport), cantități neesențiale de ARN, fosfolipide, ioni și proteine nonhistonice. Cromatina nucleului interfazic (perioada dintre două diviziuni nucleare) se prezintă sub forma unei rețele, rezultată printr-o puternică despiralizare, încolăcire, suprapunere a cromozomilor. Cercetările asupra nucleelor interfazice au arătat că unele porțiuni ale cromatinei se colorează mai intens, pe când altele mai slab. Co-

lorația diferită se datorează gradului diferit de spiralizare a moleculelor de ADN (cromozomilor). Porțiunile nucleului intens colorate au fost denumite **heterocromatină**, iar cele mai slab colorate – **euromatină**. Aceste două regiuni se deosebesc structural și funcțional. Heterocromatina are o cantitate mai mare de material cromatic, deoarece ADN-ul acestor regiuni este compact spiralizat și conținutul histonelor este mărit. Heterocromatina nu este activă în sinteza ARN, deoarece conține un număr mare de ADN-satelit în care se repetă frecvent același tip de nucleotide. Replicarea ADN-ului acestei regiuni are loc mai târziu decât ADN-ul euromatinei. Euromatina este localizată, în special, în partea centrală a nucleului, conține ADN puternic despiralizat, activ din punct de vedere genetic. Deoarece aici sunt concentrate majoritatea genelor, în aceste regiuni are loc sinteza permanentă a ARN-ului.

Nucleolul este o structură caracteristică nucleelor interfazice. Prezența nucleolului depinde de:

- Faza ciclului celular. El dezintegrează în timpul diviziunii celulare, reappare în telofază și rămâne atașat de cromozomi în interfază.
- Specie, vârsta celulei și gradul de ploidie. De exemplu, în nucleele multor specii de plante și animale există unul sau doi, trei nucleoli pentru un singur set haploid de cromozomi. În celulele tubului polenic, ale unor spermatozoizi, alge, în eritrocitele păsărilor nucleolul lipsește.

Nucleolii sunt structuri polimorfe, dar în mod frecvent sunt formațiuni sferice cu densitatea ridicată. Substanța fundamentală a nucleolilor este proteina, aproximativ 69%; de asemenea, au fost atestate toate tipurile de ARN, circa 20%, și ADN cu rolul de organizator nucleolar. Pe lângă substanțele menționate, în nucleoli au fost atestate: fosfoproteine, substanțe minerale (Ca, Zn, K, Fe, Co), enzime.

În structura nucleolului se disting două regiuni principale: regiunea fibrilară centrală și regiunea granulară periferică. În regiunea fibrilară are loc sinteza ARNr, iar în cea granulară asamblarea unităților ribozomale. Astfel, funcția de bază a nucleolilor este sinteza ARNr și asamblarea unităților ribozomale.

Carioplasma (sucul celular) este substanța fundamentală a nucleului, prezintă o masă lipsită de structura definită ce înconjoară cromozomii și nucleolii. Vâscozitatea carioplasmei este echivalentă cu cea a hialoplasmei, însă mediul ei este mai acid. Carioplasma conține proteine, ARN și ribozomi care „țin calea” spre citoplasmă.

Semnificația biologică:

- Nucleul este depozitul informației ereditare.
- ADN nuclear este organizat din gene care reglează întreaga activitate celulară.
- Diviziunea nucleului se află la baza înmulțirii celulare, deci și a reproducerii.
- În nucleolii nucleari are loc sinteza ARNr și asamblarea unităților ribozomale.

Nucleul celulelor procariote. Spre deosebire de celula eucariotă, „nucleul” bacterian reprezintă o formă primitivă de organizare, lipsită de membrană, încorporată direct în citoplasmă, de regulă în partea centrală a celulei, și care nu suferă modificări de tip mitotic în cursul ciclului de diviziune. Datorită caracterelor sale particulare această structură a fost desemnată cu numeroși termeni ca: *nucleoid*, *nucleosom*, *material nuclear*, *nucleoplasmă* sau *nucleu* prin analogie funcțională cu structura echivalentă a celulelor eucariote. Nucleoidul bacterian prezintă o moleculă de ADN circulară care în stare desfășurată depășește de circa 1000 de ori lungimea liniară a celulei. Ea este „împachetată” astfel că formează un corp de 1500 de ori mai mic decât propria sa dimensiune. Bacteriile sunt organisme haploide. În mod normal, bacteriile aflate în stare de repaus, în culturi staționare și vechi, au un singur cromozom, în faza activă de creștere au 2-4 cromozomi care sunt genetic identici și provin din replicarea unui singur cromozom.

Semnificația biologică. Cromozomul bacterian poartă în structura sa toată informația genetică esențială, necesară pentru existența unei celule – gene necesare pentru metabolismul energetic, pentru biosinteză, creștere și diviziune, pentru reglarea activităților celulare.

Semnificația biologică a glicocalexului la eucariote. Glicocalexul. Plasmalema celulelor animale și a celulelor procariote posedă pe suprafața externă un strat numit glicocalex. Glicocalexul este format din molecule de polizaharide ramificate, care intră în componența lipidelor și proteinelor (glicolipide, glicoproteine) și prezintă un strat subțire, cu densitatea mică, care nu poate îndeplini careva funcții mecanice sau protectoare. Glicocalexul celulei procariote este alcătuit dintr-o masă de natură polizaharidică situată la suprafața membranei externe la celulele gram-negative sau pe suprafața stratului peptidoglicanic la celulele gram-pozitive.

- Recepționează informația despre mediul extern.
- Filtrează conținutul mediului extern care se îndreaptă spre plasmalemă.
- Formează mediul extracelular.

Semnificația biologică a glicocalexului la procariote:

- Formează colonii bacteriene.
- Leagă diferiți ioni din mediul extern, utilizați mai apoi pentru nutriția celulară; asigură fixarea pe celulele vegetale sau animale.
- Împiedică fagocitarea bacteriilor de către leucocite și fixarea anticorpilor protectori din organismul infectat.
- Asigură fixarea bacteriilor acvatice de substrat.

Peretele celular. Celulele procariote, micotice, vegetale și unele celule animale (epiteliale) sunt acoperite cu un strat rigid, dens, deseori pluristratificat – perete celular, format din doi componenți:

- matricea – structură amorfă, gelatinoasă, care reprezintă baza peretelui celular;
- sistemul fibrilar inclus în matrice.

Componența chimică. La baza structurii chimice a peretelui celular se află polizaharidele care topologic sunt aranjate astfel, încât peretele celular este permeabil pentru apă, săruri, molecule organice (fig. 56). Pentru fiecare tip de celulă este caracteristic un anumit polizaharid.

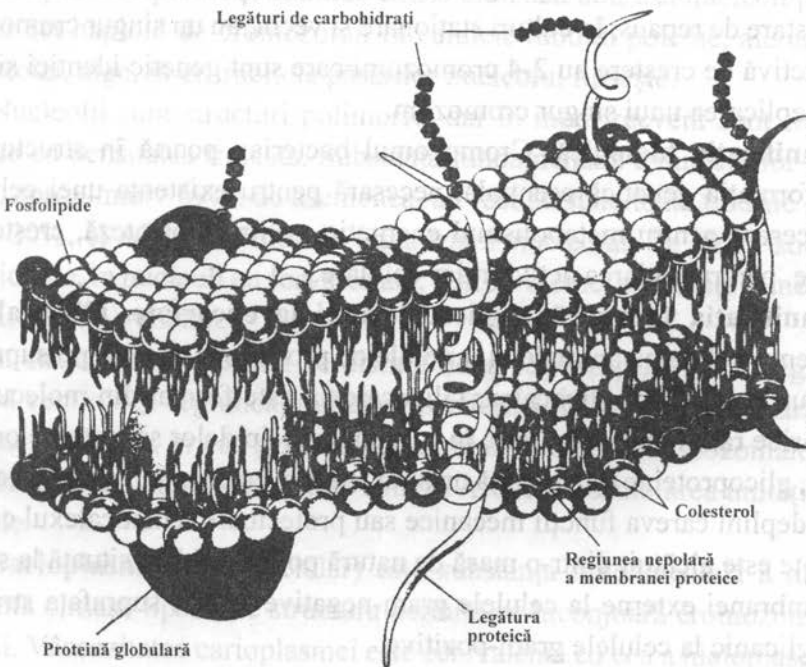


Fig. 56. Membrana plasmatică.

Din structura chimică a peretelui celular al unor celule fac parte: lignina – polimer de natură fenolică; ciara; chitina; suberina; substanțele minerale. Acești compuși minimalizează permeabilitatea peretelui celular, sunt tipici pentru celulele moarte.

Hifele miceliale ale ciupercilor (fungilor) sunt acoperite cu perete celular, a cărui element principal este chitina – component fibrilar format din molecule polizaharidice.

Matricea peretelui celular micotic este formată din glicoproteine și proteine-enzime, necesare pentru descompunerea extracelulară a biopolimerilor (celuloza, hemiceluloza, lignina etc.). Peretele celular al drojdiilor (levurilor) în componentul fibrilar conține polizaharidul-poliglicanul.

Peretele celular al celulei vegetale (anelopa) se formează cu participarea plasmalemei din materialul secretat de celulă. După nivelul de organizare poate fi distins peretele celular primar – la celulele tinere și peretele celular secundar – la celulele diferențiate. Matricea peretelui celular vegetal conține hemiceluloză și substanțe pectice. Hemiceluloza este puternic hidratată, solubilă în alcalii concentrate, nu formează fibre și cristale. Substanțele pectice sunt polizaharide acide, lanțuri lungi liniare sau ramificate, formează compuși cu magneziu și calciu.

Sistemul fibrilar este format din celuloză – polimerul liniar, neramificat al glucozei, care poate conține 300-3000 de resturi glucozice.

La unele celule (xilemice, sclerenchimice) peretele celular este încrustat cu lignină, celule lemnificate cu o rezistență sporită.

Celula procariotă este delimitată de un perete celular bine definit structural și cu consistență rigidă.

Sistemul fibrilar al peretelui celular procariot constă din peptidoglican, este un heteropolimer compus dintr-o porțiune de glican și o componentă peptidică, care în esență este o moleculă unică, gigantă și rigidă, ce formează în jurul celulei o rețea ca o plasă rigidă, cu „ochiuri” mici.

Matricea este reprezentată prin biopolimeri: proteine și polizaharide.

În funcție de structură și compoziția chimică, pereții celulari ai bacteriilor aparțin la două categorii principale de celule, care coincid cu modul de colorare gram: *gram-pozitiv*, *gram-negativ*. Bacteriile gram-pozitive posedă un component major peptidoglicanul (80-90% din masa uscată), iar biopolimerii includ acizi teihoici, teihuronici, neteichoici și polizaharide neutre. Bacteriile gram-negative posedă perete celular cu o structură polistratificată alcătuită din: peptidoglican (2-10% din masa uscată), un

strat de lipoproteine globulare și membrană externă cu o structură similară plasmalemei. Stratul lipoproteic realizează legătura dintre peptidoglican și membrana externă.

Semnificația biologică:

- Conferă o anumită formă celulei.
- Reprezintă un sistem de susținere mecanică.
- Participă la endocitoză.
- Protecție de șocul osmotic.

Citoplasma. Conținutul celular intern, cu excepția nucleului, poartă numele de *citoplasmă*. Citoplasma prezintă un sistem dinamic pentru care sunt caracteristici curenții citoplasmatici ce pun în mișcare întreg conținutul celular, realizând transportul de energie, al diverselor substanțe și al organelor celulare (mitocondriile, plastidele etc.).

Citoplasma celulelor eucariote nu este omogenă după structură, funcții și compoziție, fiind organizată din 3 părți principale: hialoplasma, componenții membranari și componenții lipsiți de membrană.

Hialoplasma. Substanța celulară fundamentală (matricea) ocupă spațiul dintre organele celulare și prezintă o stare coloidală, a cărei fază lichidă constă din apă, în care sunt dizolvate săruri minerale, glucide, aminoacizi, acizi grași, nucleotide, vitamine, gaze și biopolimerii (proteine, ARN, polizaharide) ce formează faza coloidală. Componența chimică depinde de starea fiziologică, specializare și condițiile de existență a celulei. Hialoplasma se prezintă sub forma unei rețele de microtubuli și microfibrile care poartă ribozomi. Asocierea dintre ribozomi și fibrile conferă hialoplasmei o reacție bazică. Hialoplasma este un mediu transparent, lipsit de o structură determinată, și poate trece în diferite stări de agregare (lichidă, gelatinoasă, coloidală). Structura hialoplasmei este diferită în diverse zone celulare.

Semnificația biologică:

- Hialoplasma furnizează materie pentru construcția membranelor celulare, microtubulilor, filamentelor și microfilamentelor.
- Asigură legătura și interacțiunea chimică dintre toate structurile celulare.
- Realizează transportul intracelular al aminoacizilor, acizilor grași, nucleotidelor, glucidelor, ATP, ionilor.
- Servește ca depozit pentru substanțele de rezervă – amidon, glicogen, picături de grăsimi.

Reticulul endoplasmatic (RE). RE (din lat. *reticulum* – rețea) prezintă un sistem ramificat de cavități: canale, vezicule și cisterne, cu diametrul 20-50 nm, mărginite de o membrană cu grosimea între 6-7 nm, care străbat toată citoplasma celulară pornind de la membrana nucleară până la plasmalemă. Conținutul intern al cavităților RE – *matricea* – un lichid lipsit de structură definită, conține proteine solubile, fosfolipide, enzime etc. Gradul de dezvoltare a RE depinde de nivelul maturizării funcționale și de specializarea celulei. De exemplu, eritrocitele sunt lipsite de RE, iar celulele secretorii au RE bine dezvoltat.

Există două tipuri de RE care conform anumitor ipoteze au aceeași proveniență și topografie, dar se deosebesc esențial morfologic și funcțional.

RE rugos (REr) sau granular are suprafața externă a membranelor acoperită cu ribozomi care pot fi solitari sau formează îngrămădiri în formă de spire, struguri etc. În celulele nediferențiate REr este rar întâlnit, pe când în celulele specializate în sinteza și secreția proteinelor, enzimelor formează îngrămădiri (ergastoplasma). REr poate pierde ribozomii, astfel transformându-se în RE neted (REn). REn nu conține ribozomi pe suprafața externă, se presupune că este secundar în raport cu REr, deoarece provine de la acesta. Densitatea REn în citoplasmă este diferită la diferite celule și în diferite zone celulare. Celulele care secretă steroizi, cum ar fi celulele scoarței suprarenalelor, au o densitate mare de vezicule, canale, tuburi ale REn. O densitate sporită a REn a fost atestată în acele zone celulare în care se depozitează glicogen, fiecare miofibrilă a mușchilor striati este înconjurată de vacuolele și canalele REn etc.

Semnificația biologică:

- Fiind o rețea membranară care străbate celula, RE are funcția de suport al structurilor celulare.
- RE este generator de cisterne pentru aparatul Golgi.
- Pe ribozomii REr are loc sinteza proteinelor, destinate „exportului” (Proteinele necesare celulei sunt sintetizate pe ribozomii hialoplasmatici).
- Proteinele sintetizate pe ribozomii REr trec în canalele lui unde: **sunt fosforilate**, transformate în **glicoproteine**, reorganizate spațial etc.
- Proteinele „maturizate”, prin canalele REr, sunt transportate și încorporate în săculețele aparatului Golgi.
- În cavitățile REn are loc sinteza trigliceridelor, lipidelor, polizaharidelor.
- REn este depozit pentru ionii de calciu (sarcoplasma celulelor musculare).
- REn asigură transportul lipidelor, polizaharidelor și încorporarea lor în săculețele aparatului Golgi.

Aparatul Golgi (AG). AG a fost descoperit în citoplasma celulelor eucariote, în anul 1898, de către savantul Camillo Golgi. Structura electrono-microscopică a AG este unică pentru toate celulele eucariote, însă diferă forma și dimensiunile. AG prezintă un sistem de *dictiozomi*. Fiecare dictiozom este format din 5-10 cisterne (sacule) membranare, de la care pornesc tuburi, ce formează o rețea și veziculele secretorii – vezicule golgiene. Pentru fiecare dictiozom sunt caracteristice 2 zone (fațete) funcțional diferite:

1. Zona distală – zona cisternelor „maturizate” și a destrămării lor în vezicule golgiene are forma concavă și este orientată spre plasmalemă.

2. Zona proximală sau zona generativă, convexă, orientată spre RE, de la care vin vezicule pline cu proteine, lipide (vezicule de tranziție). În această zonă ele se contopesc, astfel formându-se săculețele aparatului Golgi.

În celulele animale AG este de tip spongios, formând o rețea în care dictiozomii sunt legați prin intermediul structurilor membranare. În celulele vegetale AG este de tip difuz – conține dictiozomi solitari, uniform răspândiți în hialoplasmă. Numărul dictiozomilor în celule variază de la câteva unități până la câteva zeci și sute, în funcție de tipul de celulă și faza de dezvoltare celulară. Celulele secretoare, meristematice au un număr mai mare de dictiozomi, pe când eritrocitele sunt lipsite de aceste organe.

Semnificația biologică:

- Acumularea și secreția substanțelor sintetizate de RE.
- Modificarea chimică a proteinelor și lipidelor sintetizate de RE.
- Sinteza mucoproteinelor, mucopolizaharidelor, polizaharidelor peretelui celular al celulei vegetale.
- Evacuarea substanțelor sintetizate în celulă.
- Generator de lizozomi și vacuole (celula vegetală).
- Participă la reînnoirea, regenerarea plasmalemei.

Lizozomii – structuri celulare membranare, descoperite în anul 1958 de C. De Duve, prezente în majoritatea celulelor eucariote, predominând în cele animale. Lizozomii nu sunt structuri celulare autonome, ei rezultă din activitatea RE și a AG. Lizozomii prezintă saci membranari simpli, proveniți din AG care încorporează aproximativ 60 tipuri de enzime: hidrolaze (digestive); proteaze; nucleaze; fosfataze acide; lipaze. Aceste enzime sunt sintetizate pe RER, apoi transferate spre AG, unde are loc „maturizarea” lor chimică și încorporarea în vezicule ce se despart de la AG – lizozomii.

Semnificația biologică:

- Descompunerea biopolimerilor celulari de natură endogenă și exogenă.
- Depozit pentru enzime.
- Depozit pentru reziduurile nedigerate.

Peroxisomii – lizozomi ce conțin enzima catalaza. Sunt frecvenți în celulele protozoarelor, levurilor, endospermului, țesutului verde, ficatului și rinichilor. Peroxisomii sunt generați de RE.

Semnificația biologică:

- Reducerea $H_2O_2 \rightarrow H_2O + 1/2 O_2$.
- Apără celula de produsul toxic al metabolismului H_2O_2 .

Vacuolele celulelor vegetale – reprezintă cavități celulare acoperite cu membrană unistratificată – tonoplast. Numărul și forma lor depinde de maturitatea fiziologică și specializarea celulară. Astfel, în celulele tinere pot fi câteva vacuole mici (vacuole primare), care odată cu maturizarea și diferențierea celulei se contopesc formând o vacuolă, localizată în centrul celulei ce ocupă aproximativ 80% din volumul celular. Vacuolele primare provin din canalele RE. Conținutul vacuolar reprezintă sucul celular – soluție apoasă de substanțe organice și anorganice, a cărui conținut calitativ și cantitativ depinde de: tipul de plantă, organ, țesut, starea fiziologică celulară. Astfel, sucul celular al vacuolelor conține: săruri minerale, glucide, acizi organici, aminoacizi, proteine, substanțe fiziologic active.

Semnificația biologică:

- Menține turgescența și asigură regimul de apă celular.
- Reprezintă un depozit pentru produsele metabolismului cu rol de substanțe de rezervă și toxice.
- Sucul celular conține pigmenți din grupa antocianilor de culoare roșie, albastră, purpurie etc., care determină culoarea petalelor, fructelor, mugurilor, frunzelor.
- Sucul celular conține enzime hidrolitice, deci vacuolele au rolul de lizozomi secundari în celulele vii și de autofagozomi în celulele moarte.

Sistemul vacuolar al citoplasmei. RE, AG, lizozomii, peroxizomii, vacuolele celulelor vegetale formează sistemul vacuolar al citoplasmei – sistem membranar integru prin funcțiile sale, prin capacitatea de convertire a unor elemente membranare în altele în urma restructurării și modificării lor. Sistemul vacuolar pornește de la membrana nucleară externă prin convertirea ei

în membranele RER. În urma „pierderii” ribozomilor din RER ia naștere REN. Din elementele membranare ale RE, prin îngroșarea și restructurarea lor, provin saculii AG, iar în celulele vegetale – și vacuolele.

De la membranele AG provin membranele veziculelor golgiene (vezicule secretorii, lizozomii, peroxizomii) care se contopesc cu plasmalema în procesul exocitozei, contribuind la reînnoirea ei. Aceste convertiri asigură sinteza și transportul biopolimerilor destinați exportului.

Mitocondriile – organite existente în celulele aerobe animale și vegetale, lipsesc însă în celulele lignificate și în cele cu metabolismul anaerob (celulele organismelor parazite, cu viață intracelulară, ca de exemplu *Plasmodiul*). Observate la microscopul fonic, mitocondriile se prezintă sub forma unor granule sferice, filamentoase, bastonașe sau șiraguri de granule. Mitocondriile variază, de asemenea, în privința dimensiunilor, numărului și localizării în funcție de tipul celulei, țesutului, speciei. Dimensiunea mitocondriilor este relativ constantă și variază între 0,5-1,0 nm lățime și 0,3-10 nm lungime. Mitocondriile au capacitatea de a se mișca activ sau pasiv. Localizarea lor în celulă este variată: pot fi răspândite uniform sau formează aglomerări în zonele în care se găsește o cantitate sporită de substrat de oxidare sau în care este necesară o cantitate ridicată de ATP. În celulele protozoarelor mitocondriile sunt localizate în special la baza cililor, flagelilor; în celulele nervoase – aproape de sinapse; în celulele secretorii – în regiunea reticulului endoplasmic etc.

Cercetări la microscopul electronic au demonstrat că mitocondriile sunt limitate la exterior de o membrană dublă, care înconjoară un spațiu denumit *matrice*. Membranele au grosimea de aproximativ 7 nm și sunt separate de un spațiu perimitochondrial transparent cu grosimea de 10-20 nm. Membrana externă cu structură, proprietăți și funcții caracteristice membranelor biologice este continuă. Membrana internă formează în interiorul mitocondriilor invaginări denumite *criste*. Numărul și orientarea cristelor sunt variabile, fiind dependente de activitatea celulară. În celulele tinere, în care se desfășoară o activitate oxidativă intensă, numărul cristelor este mare, comparativ cu celulele bătrâne și cele care consumă o cantitate redusă de energie. Interiorul mitocondriilor, delimitat de membrana internă și criste, este ocupat de o substanță denumită matrice – substanța fundamentală a mitocondriilor, a cărei structură internă este asemănătoare hialoplasmei. Matricea mitocondriilor conține ribozomi, ADN mitocondrial și un set complet de enzime necesar pentru sinteza proteinelor. Funcția esențială este producerea de ATP în baza energiei chimice eliberată în urma oxidării substratului organic până la CO_2 și H_2O .

Plastidele – organite celulare caracteristice doar regnului vegetal. După natura substanțelor ce formează conținutul intern, plastidele sunt grupate în 3 clase:

Plastidele clorofilene – cloroplastele. Sunt cele mai răspândite plastide, fiind prezente în toate celulele țesuturilor verzi din frunze, flori și fructe, rădăcini aeriene. Numărul cloroplastelor variază de la celulă la celulă și de la specie la specie; ele diferă, de asemenea, morfologic și dimensional. Cloroplastele sunt delimitate de o membrană dublă (membrana externă și membrana internă), a cărei straturi au grosimea de 7 nm, sunt separate printr-un spațiu cu grosimea de 20-30 nm. Membrana internă delimitează conținutul cloroplastelor denumit *stromă* și formează în interior invaginări sub forma unor pliuri – *lamellele* stromei. Spațiul dintre lamele este completat de saculi membranari mai mici, de formă discooidală, denumiți *tilacoizi*. Tilacoizii sunt dispuși în grup, uniți unul de altul, formând *grana*. Numărul de tilacoizi într-o stromă variază de la 2-3 până la 50. Cranele, la rândul lor, sunt unite prin intermediul lamelelor care străbat stroma. Stroma cloroplastelor conține: proteine, lipide, enzime, ribozomi, ADN, grăuncioare de amidon. Plastidele în cursul vieții plantelor, în dependență de condițiile ecofiziologice, se pot modifica și converti reciproc.

Leucoplastele – plastide incolore care servesc pentru stocarea substanțelor nutritive de rezervă. În funcție de tipul de substanțe de rezervă, ele se clasifică în: amiloplaste care conțin amidon; lipidoplaste care conțin lipide; proteinoplaste sau proteoplaste care conțin proteine. Leucoplastele se deosebesc de cloroplaste și cromoplaste prin lipsa pigmentilor și a sistemului lamelar al stromei.

Cromoplastele – plastidele purtătoare de carotenoizi (pigmenți galbeni), prezente în fructele și florile plantelor, provin în special din cloroplaste și mai rar din leucoplaste. Astfel de convertire se realizează în urma micșorării numărului de membrane din stromă, dispariției clorofilei și a amidonului. Cromoplastele sunt formele degenerate ale cloroplastelor. Cloroplastele sunt structuri membranare, unde are loc realizarea fotosintezei. Cromoplastele conțin pigmenți galbeni, carotenoizi, care conferă culoare fructelor și florilor, astfel creând condiții pentru polenizare și răspândirea semințelor, și apără planta de distrugerea fotooxidativă. Leucoplastele servesc ca depozit pentru stocarea substanțelor de rezervă.

Ribozomii. Descriși pentru prima dată de savantul român G.E.Palade, în 1955, ribozomii sunt organite celulare de dimensiuni mici, lipsite de mem-

brană (diametrul – circa 20 nm). Ponderea lor în celulă este esențială atât la procariote, cât și la eucariote. Celulele eucariote posedă câteva tipuri de ribozomi: ribozomi citoplasmatici (solitari) și atașați de membranele REr, și de membrana nucleară externă; ribozomi mitocondriali – localizați în matricea mitocondriilor; ribozomii carioplasmici; ribozomii cloroplastelor celulelor vegetale.

Ribozomii sunt formați din două subunități – subunitatea mare și subunitatea mică, diferite după masă și constanta de sedimentare.

ARNr și proteinele în raport de circa 1: 1 sunt componenții chimici ai ribozomilor.

Ribozomii sunt componenții esențiali în valorificarea informației genetice, reprezentând „fabrici” de proteine.

Centriolii, care au fost atestați în toate celulele animale și doar în celulele plantelor inferioare, prezintă cilindri cavi, formați din 9 triplete de microtubuli unite între ele prin fibrile. În interfază celula conține doi centrioli, dispuși reciproc perpendicular, astfel formând centrul celular, localizat în preajma membranei nucleare. În perioada diviziunii celulare fiecare centriol se dublează, deplasându-se câte doi spre polii celulei, iar de la ei pornesc firele fusului de diviziuni celulare.

Firele fusului de diviziune – microtubuli asamblați din tubulină și alte proteine.

Aceste fire se assemblează și în celulele lipsite de centrioli. Ele au semnificație în mișcarea cromozomilor de la ecuator spre poli.

Se presupune că centrii celulari (prezenți și în celulele lipsite de centrioli) dirijează formarea firelor fusului de diviziune celulară.

- **Corpii bazali.** Identici conform structurii și funcției centriolilor, sunt atestați la baza cililor și flagelilor. Ca și firele fusului de diviziune, corpii bazali asigură mișcarea flagelilor și cililor, alunecarea filamentelor din care sunt asamblați.

- **Transportul intracelular.** Cercetările asupra sistemului microtubular celular au arătat, că **microtubulii** asigură mișcarea organitelor în celulă (a veziculelor golgiene, lizozomilor, mitocondriilor). Denaturarea artificială a microtubulilor cauzează imobilitatea organitelor celulare.

- **Citoscheletul.** Microtubulii, paralel cu funcțiile lor active, mai îndeplinesc și funcții pasive, conferind celulei o anumită formă, în special, celei lipsite de perete celular. Celulele animale lipsite de acest schelet devin sferice.

Microfilamentele – fire subțiri (diametrul 5-7 nm), formate din actină, structural asemănătoare cu actina mușchilor. Ele formează mănunchiuri în

preajma plasmalemei, participând la procesele de endo- și exocitoză. Unele microfilamente sunt formate din miozină (cantități neesențiale). Mecanismul funcționării actinei și miozinei este diferit de cel în fibrele musculare; microfibrilele funcționează independent.

6.3. Acizii nucleici

Acidul dezoxiribonucleic (ADN). Macromolecula de ADN este bicatenară, fiind formată din două lanțuri polinucleotidice, înfășurate elicoidal în jurul unui ax comun, astfel că formează un dublu helix. Datorită faptului că legăturile dintre două nucleotide succesive sunt de tip 5'-3', cele două catene ale helixului de ADN sunt antiparalele. Cele două lanțuri polinucleotidice sunt complementare, în sensul că întotdeauna o nucleotidă, care conține o bază azotată purinică, se leagă cu una ce conține o bază azotată pirimidinică și invers. Ca urmare, în macromolecula de ADN nu există decât 4 tipuri de legături A-T, T-A, G-C, C-G. Structura bicatenară a ADN se realizează cu ajutorul unor punți de hidrogen (duble între adenină și timină și triple între guanină și citozină). Aceste legături sunt de natură electrostatică.

Denaturarea și renaturarea ADN. Un fenomen foarte interesant, legat de structura bicatenară a ADN, este *denaturarea*. Prin încălzirea, de exemplu, a soluției în care se găsește ADN, cele două catene se despart și ADN devine monocatenar. Dacă se realizează o răcire bruscă a soluției, moleculele rămân sub formă monocatenară și capătă denumirea de *ADN denaturat*. Dacă răcirea se realizează treptat, se refac punțile de hidrogen dintre cele două tipuri de catene complementare și moleculele devin bicatenare, rezultând *ADN renaturat*. Astfel, se pot realiza *hibridi moleculari* într-un amestec de catene de ADN, provenind de la diferite specii. Măsura în care se realizează renaturarea depinde de secvența nucleotidelor în cadrul moleculelor de ADN. Cu cât speciile sunt mai înrudite, cu atât renaturarea se realizează mai repede și într-o proporție mai mare și invers. De asemenea, se pot realiza *hibridi moleculari ADN-ARN*.

Replicația ADN. În celulele fiecărei specii se găsește o anumită cantitate de ADN, în care se află sub formă codificată informația genetică. Pentru realizarea diviziunii celulare este necesară, printre altele, dublarea prealabilă a cantității de material genetic. În acest fel, celulele-fiice vor avea aceeași cantitate de ADN cu celula-mamă. Sinteza ADN poartă denumirea de **replicație**, deoarece se realizează după *modelul semiconservator*. Prin ruperea punților

de hidrogen, macromolecula de ADN se separă în cele două catene complementare, iar nucleotidele libere din citoplasmă se atașează pe bază de complementaritate de catenele vechi. Vor rezulta două molecule de ADN bicatenar, fiecare având o catenă veche (care a avut rolul de model) și o catenă nou-sintetizată. În felul acesta, se asigură sinteza noilor molecule de ADN cu o mare fidelitate, moleculele-fiice fiind identice cu molecula-mamă. În procesul de replicare al ADN intervin numeroase enzime, cum sunt ADN-polimerazele, ligazele etc.

Acidul ribonucleic (ARN). Acești acizi nucleici au, în general, o structură monocatenară, fiind alcătuiți dintr-un singur lanț polinucleotidic. Există mai multe tipuri de ARN care au funcții diferite:

1. ARN viral constituie materialul genetic al unor ribovirusuri, cum sunt: virusul mozaicului tutunului, virusul poliomielitei, virusul gripal etc.

2. ARN mesager (ARNm) are rolul de a copia informația genetică a unei catene de ADN și, în felul acesta, realizează ceea ce se cheamă *fenomenul de transcripție*, o etapă în procesul de decodificare a informației genetice și de sinteză proteică. La ARNm succesiunea nucleotidelor este complementară cu cea a catenei de ADN de la care a copiat informația. Masa moleculară a ARNm este variabilă, deoarece și mărimea informației copiate este variabilă.

3. ARN de transfer (ARNt) are rolul de a transfera aminoacizii la locul sintezei proteice. Are o masă moleculară mică și relativ constantă, fiind alcătuit dintr-o succesiune de 70-90 de nucleotide. Este monocatenar, cu porțiuni bicatenare, care formează o tijă și trei bucle mari, fapt care îi conferă forma unei frunze de trifoi.

4. ARN ribozomal (ARNr) intră în alcătuirea ribozomilor și are rol important în sinteza celulară a proteinelor, în molecula sa sunt numeroase plieri neuniforme datorită legăturilor dintre nucleotidele complementare *U-A* sau *G-C*. La procariote și eucariote există mai multe tipuri de ARNr.

6.4. Diviziunea celulară

Reproducerea organismului are la baza sa reproducerea celulară. Perioada ce se derulează între două diviziuni mitotice alcătuiește **ciclul celular** (din gr. „*kyklos*” – cerc). Ciclul celular cuprinde interfaza și diviziunea celulei (fig. 57).

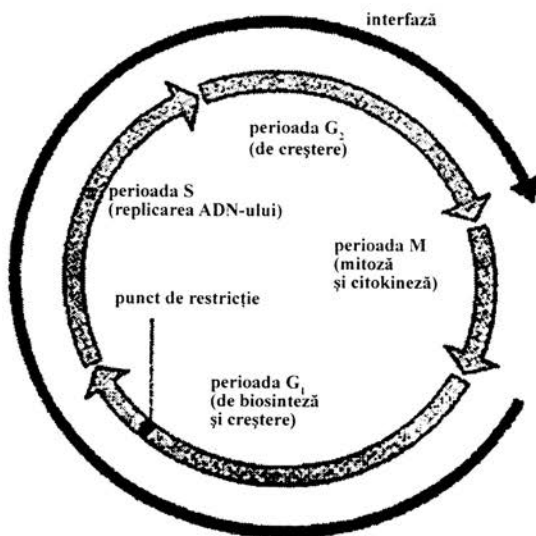


Fig. 57. Schema ciclului celular:

G_1 – perioada presintetică; S – perioada sintetică;
 G_2 – perioada postsintetică; M – mitoză.

Interfaza (din gr. „*inter*” – între și gr. „*phasis*” – aspect) reprezintă intervalul dintre două mitoze consecutive. În interfază, celula se pregătește de diviziune, aceasta însă nu înseamnă că ea se află în stare de repaus, dimpotrivă, este cea mai activă din punct de vedere metabolic în ciclul celular, în care au loc o serie de procese esențiale pentru declanșarea diviziunii celulare.

În această etapă a ciclului celular, nucleul reprezintă o structură optic uniformă, cromozomii sunt despiralizați, vizibili fiind doar nucleolii.

Interfaza este formată din trei perioade (subfaze), iar fiecare dintre ele se caracterizează printr-o serie de particularități.

Perioada G_1 (presintetică) (din eng. „*G-gop*” – gol).

În perioada G_1 nu se produce sinteza ADN-ului (cantitatea de ADN este $2n$ ($2c$)), dar se sintetizează intensiv ARNm, proteinele, enzimele. În afară de aceasta, în celulă se acumulează ATP, iar numărul de organele celulare crește.

Perioada G_1 constituie 25-50% din timpul interfazei (4-10 ore). La o serie de celule (celulele maligne) plasmodiul mixomicetei (*Fusarium*) poate lipsi.

Perioada S (sintetică) (din eng. „*S-synthesis*” – sinteză).

În această perioadă are loc reduplicarea ADN-ului, cantitatea lui variind între $2c$ și $4c$ (după numărul de cromatide). Paralel cu sinteza ARNr continuă sinteza ARNm.

Perioada S ocupă 35-40% (5-8 ore) din interfază. Ea nu poate lipsi în ciclul celular.

Perioada G₂ (postsintetică).

În această perioadă continuă sinteza ARN-ului și a proteinelor. Se sintetizează în cantități mari tubulinele, actina și miozina, acestea fiind necesare dividerii celulare.

Perioada G₂ are o durată de 20-35% (3-5 ore) din interfază. După interfază celula se divide.

Reproducerea celulelor asigură creșterea, multiplicarea, diferențierea și regenerarea țesuturilor, iar, în cele din urmă, continuitatea vieții.

Celulele procariote se reproduc ca rezultat al dividerii simple, fie prin strangulație (bacteriile gram-negative), lamelă mediană (bacteriile gram-pozitive) sau prin înmugurire (la rizobii).

În prealabil, în celula inițială are loc reduplicarea moleculei de ADN cu participarea nemijlocită a plasmalemei, astfel celulele-fiice primesc aceeași informație ereditară localizată în nucleoid.

Celulele eucariote se reproduc pe două căi:

prin diviziunea directă (amitoză);

prin diviziunea indirectă (cariochineză și citochineză).

Diviziunea directă reprezintă o simplă scindare a nucleului și a citoplasmei, iar diviziunea indirectă are loc în urma unor schimbări ale substanței nucleare. Diviziunea indirectă poate fi:

tipică sau ecvațională (mitoza);

atipică sau reducțională (meioza).

3.4.2. Amitoza (din gr. „a” – fără, „mitos” – fir, filament) reprezintă diviziunea directă a celulei, al cărei nucleu se află în interfază. Amitoza a fost descoperită înaintea mitozei. Ea se întâlnește la majoritatea organismelor eucariote: protozoare, metazoare, plante și este tipică atât pentru animalele nevertebrate, cât și pentru plantele unicelulare.

Amitoza se caracterizează printr-o serie de particularități:

- în această diviziune nu are loc condensarea cromozomilor;
- nu are loc formarea fusului de diviziune;
- inițial se multiplică nucleolii;
- dividerea nucleului are loc prin strangulare;
- după dividerea nucleului nu este obligatorie și dividerea citoplasmei

(ca rezultat se obțin celule polinucleare).

Diviziunea amitotică este mai frecventă în celulele din țesuturile patologice sau în celulele bătrâne, care și-au redus capacitatea de diferențiere.

În condiții normale, prin amitoză se multiplică unele dintre foițele embrionare ale animalelor, celulele foliculare ale ovarului, celulele glandelor endocrine și ale ficatului, iar la plante – celulele ovarului, parenchimul tuberculelor, endospermul.

Mitoza (din gr. „*mitos*” – filament) reprezintă diviziunea indirectă a celulelor somatice cu dublarea prealabilă și repartizarea uniformă a numărului de cromozomi (materialul ereditar) în celulele-fiice. Mitoza are loc în celulele ce se află în plină creștere: țesutul embrionar și țesuturile meristemice ale plantelor, organele hematopoietice și țesuturile epidermice ale animalelor, etc. Această diviziune asigură înmulțirea celulelor, creșterea și diferențierea individuală, continuitatea genotipului.

Mitoza a fost descoperită pentru prima dată de W. Fleming, în 1879. Diviziunea mitotică are loc în celulele-mamă diploide (cu $2n$ cromozomi sau $2c$). În urma diviziunii mitotice, celula se dublează, generând două celule-fiice identice cu celula-mamă (cu $2n$ cromozomi sau $2c$). Ea ocupă circa 10% din ciclul celular. În funcție de specie, din care fac parte celulele ce se divid, mitoza poate dura între câteva minute și câteva ore.

Mitoza este alcătuită din 4 faze succesive:

Profaza – perioada în care cromozomii devin vizibili în urma spiralizării și condensării. Fiecare cromozom este dublat longitudinal și se evidențiază cele două cromatide răsucite una în jurul celeilalte, unite în regiunea centromerului. Spre sfârșitul profazei apar centrii mitotici, nucleolii devin mai mici și chiar dispar complet, degradează membrana nucleară.

În concluzie: profaza mitozei se caracterizează prin următoarele procese:

- dublarea centriolilor (încă în interfază) și migrarea lor spre polii celulei;
- condensarea cromatinei și evidențierea cromozomilor;
- degradarea nucleolilor;
- degradarea membranei nucleare (și, ca rezultat, a unei părți din reticulul endoplasmatic rugos);
- formarea fusului de diviziune (în celulele animale fusul de diviziune este radial, în celulele vegetale el este aranjat într-un singur plan);
- amestecul carioplasmei și hialoplasmei.

Profaza ocupă circa 50% (30 min.) din mitoză.

Metafaza – etapa în care cromozomii sunt delimitați și se aranjează în regiunea ecuatorului, unde formează placa metafazică. Metafaza este stadiul în care se pot stabili, cu deosebită precizie, numărul, forma, mărimea cromozomilor specifici fiecărei specii.

Cromozomii se atașează de centromer cu fibrele fusului de diviziune (pe fiecare fibră câte un cromozom). Cele două cromatide ale fiecărui cromozom sunt așezate una lângă alta, fiind unite în regiunea centromerului. Când metafaza se apropie de sfârșit, centromerii încep să se dividă, iar de fiecare jumătate rămâne prinsă câte o cromatidă.

În metafază poate să continue degradarea membranei nucleare.

Așadar, particularitățile metafazei sunt următoarele:

- aranjarea cromozomilor la ecuatorul celulei (*fig. 58a*);
- formarea plăcii metafazice;
- aranjarea cromozomilor în formă de stea (cu centromerul spre centru);
- fixarea cromozomilor prin intermediul fusului de diviziune (fusul de diviziune este alcătuit din fibre centriolo-cromozomiale și fibre centriolo-centriolare) (*fig. 58, b*).

Metafaza alcătuiește circa 13% (8 min.) din mitoză.

3. **Anafaza** constă în clivarea longitudinală a cromozomilor și deplasarea lor (fiecare cromozom este monocromatidic) spre polii opuși ai celulei. Astfel, la polii celulei se formează două seturi de cromozomi cu aceeași constituție genetică ca și nucleul celulei-mamă.

Anafaza durează circa 7% (4 min.) din timpul mitozei și se caracterizează prin:

- deplasarea cromatidelor fiecărui cromozom spre polii celulei (viteza deplasării este de 0,2-5,0 $\mu\text{m}/\text{min.}$);
- aranjarea cromatidelor în timpul deplasării în conformitate cu poziția centromerului (*fig. 58, c*).

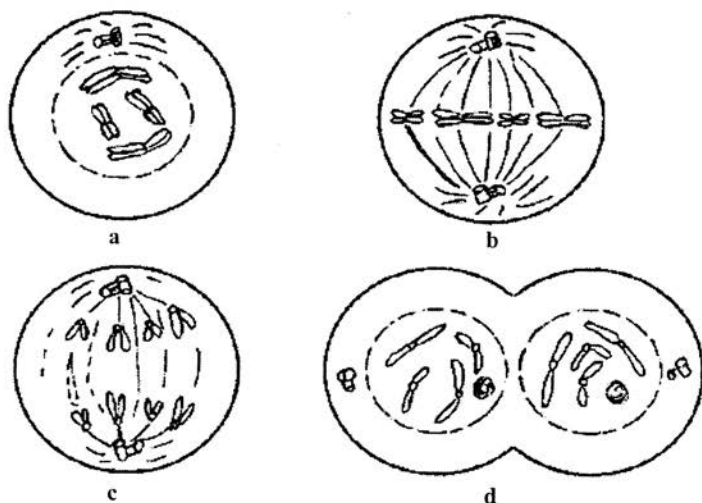


Fig. 58. Diviziunea mitotică în celula animală: a – profaza; b – metafaza; c – anafaza; d – telofaza.

Există diferite opinii referitoare la natura forțelor care mobilizează cromozomii monocromatidici (cromatidele) spre polii celulei.

Conform ipotezei biochimice, deplasarea cromozomilor, la desprinderea lor de centromer, are loc datorită polimerizării în apropierea centriolilor a tubulinei (proteină contractilă), fusului de diviziune și depolimerizării în regiunea centromerilor (chinetocorului).

Conform ipotezei fiziologice, deplasarea cromatidelor constituie rezultatul contracțiilor proteinelor contractile ale microtubulilor (actina și miozina). Ambele ipoteze merită atenție, mai ales că unele celule (celulele plantelor superioare) nu au centrioli.

4. Telofaza se caracterizează prin formarea la fiecare pol al celulei a câte un nucleu separat, care, după despiralizarea cromozomilor, devine optic omogen. Spre sfârșitul telofazei apar nucleolii. Conținutul nucleolilor este similar cu cel al celulei-mamă.

În concluzie: telofaza se caracterizează prin:

decondensarea cromozomilor;

formarea unei noi membrane nucleare;

- formarea nucleolilor;

- degradarea fusului de diviziune;

- formarea centrului celular;

- citochineza și formarea a două celule-fiice identice cu celula-mamă

(fig. 58d).

Citochineza (din gr. „*kytos*” – cavitate, „*kinesis*” – mișcare) reprezintă dividerea citoplasmei cu tot ansamblul de constituenți citoplasmatici și ai membranei celulare. Organitele celulare se repartizează într-o măsură mai mare sau mai mică între celulele-fiice. Mecanismul citochinezei diferă la plante și animale. La plante citochineza are loc prin formarea fragmoplastului (a lamelei mediane) în regiunea ecuatorului, cu extinderea ulterioară spre periferie (se presupune că fragmoplastul derivă din tubulii fusului de diviziune și decurge cu participarea aparatului Golgi), iar la animale – prin strangulare (de regulă, în regiunea centrală și orientată spre centru).

În urma mitozei, dintr-o celulă somatică (diploidă-2n) se formează două celule-fiice, în mare măsură asemănătoare între ele și cu celula-mamă (sunt, de asemenea, diploide-2n).

După gradul de asemănare dintre celulele-fiice și celula-mamă, deosebim următoarele forme de mitoză:

1) *mitoza homotipică* – celulele-fiice se aseamănă între ele, dar sunt mai mature ca celula-mamă (este caracteristică celulelor în diferențiere);

2) *mitoza homoheterotipică* (sau asimetrică) – o celulă-fiică se aseamănă cu celula-mamă, iar cealaltă diferă;

3) *mitoza de diferențiere* (sau întinerire) – celulele-fiice sunt mai tinere decât celula-mamă (este caracteristică limfocitelor).

Celulelor somatice le sunt caracteristice următoarele **variații ale mitozei**:

1. Ortomitoza – centrul de formare a microtubulilor se află în citoplasma. La rândul său, ortomitoza se poate diviza în:

a) *ortomitoză deschisă* (sau mitoză obișnuită);

b) *ortomitoză semideschisă* – se păstrează membrana nucleară, cu excepția zonelor polare (este caracteristică unor alge roșii, brune, verzi, unor ciuperci);

c) *ortomitoza închisă* – membrana nucleară se păstrează intactă. Fusul de diviziune se formează în nucleu. Se întâlnește la unele infuzorii (dividerea micronucleelor).

2. Pleuromitoza – nu se distruge membrana nucleară, iar la formarea fusului de diviziune nu participă centriolii, ci structurile din partea internă a membranei nucleare (plăcile centriolare). Se întâlnește la protozoare, la unele ciuperci (hitridiomicete, oomicete, zigomicete, ascomicete).

3. Criptomitoza – nu se formează placa metafazică. Se întâlnește la unele ciuperci inferioare, la protozoare.

4. Criptopleuromitoza – formă intermediară cu trăsături caracteristice de criptomitoză și pleuromitoză.

5. Mitoza euglenoidală – nu se formează fusul de diviziune.

6. Mitoza infuzorială – macronucleul se divide amitotic, iar micronucleul – mitotic.

7. Endomitoza – are loc mărirea cantității de ADN, ca urmare a condensării mitotice a cromozomilor și a poliploidizării. Cauza endomitozei este dereglarea activității fusului de diviziune. Se întâlnește la păduchii de apă.

8. Politenia – are loc mărirea dimensiunilor cromozomilor (cromozomii politenici) interfazici ca rezultat al replicării ADN-ului în perioada S. Cromozomii nu sunt supuși condensării mitotice (nu participă la mitoză). Politenia poate fi observată în celulele glandelor salivare ale dipterelor, în sinergidele cepei, în antipodele grâului.

Asupra mitozei acționează o serie de factori:

1) intracelulari – ce reprezintă raportul nucleoplasmatic. Odată cu creșterea volumului celulei are loc dividerea nucleului și a citoplasmei. Procesul depinde de amplificarea genelor;

2) intercelulari – ce reprezintă factorii cei mai importanți și sunt rezultatul interdependenței diverselor tipuri de celule (bătrâne și tinere) din țesut;

3) generali – ce reprezintă factorii externi (temperatura, lumina), substanțele chimice (vitamine, hormoni).

Semnificația biologică a mitozei:

- Asigură constanța numărului de cromozomi (a materialului ereditar) în procesul de dividere a celulelor somatice.
- Asigură integritatea structurală a țesuturilor în caz de pierdere a celulelor (substituirea eritrocitelor, a celulelor din epitelul intestinului etc.).
- Asigură creșterea și dezvoltarea organismului pluricelular.
- Asigură regenerarea țesuturilor și a organelor.

Meioza (din gr. „*meion*” – mai mic) reprezintă diviziunea indirectă a celulelor germinale (ovocitul și spermatoцитul de ordinul I) în zona de maturizare ce formează celulele sexuale (gameți). Meioza a fost descoperită de E. van Beneden, în 1883, la *Parascaris equorum*.

Formarea gameților este precedată de două diviziuni succesive deosebite (fig. 59):

- 1) diviziunea reduțională (sau primară, heterotipică, meioza I);
- 2) diviziunea euațională (sau secundară, homotipică, meioza II).

Ca rezultat al primei diviziuni, dintr-o celulă diploidă ($2n$) se obțin două celule haploide (n). A doua diviziune este echivalentă celei mitotice, iar din cele două celule haploide se obțin 4. În urma unor procese, aceste celule dau naștere gameților.

Meioza este precedată de interfază, în care are loc reduplicarea moleculelor de ADN (4c). Între diviziunea I și II poate exista o perioadă de trecere – interchineza, dar fără sinteză suplimentară de ADN. Fiecare diviziune este formată din 4 faze succesive (profaza, metafaza, anafaza, telofaza) cu trăsăturile lor specifice.

Profaza I se caracterizează prin schimbări profunde cu semnificație genetică deosebită. În mod obișnuit, are o durată mult mai mare decât cea a mitozei. La plante, profaza poate dura până la câteva zile, iar la animale, ea poate dura săptămâni sau chiar ani de zile (la unele mamifere). Acestei faze a meiozei îi sunt caracteristice o serie de modificări ale cromozomilor.

Profaza I este alcătuită din cinci stadii succesive: leptoten, zigoten, pahiten, diploten, diachineză.

În **leptoten** (din gr. „*leptos*” – fin, subțire; „*teino*” – a întinde) se evidențiază cromozomii subțiri, formați din 2 cromatide, fără clivaj longitudinal. Ei se împletesc într-o rețea numită spirem.

În **zigoten** (din gr. „*zigon*” – cuplu) are loc împerecherea cromozomilor omologi (unul matern și unul patern) pe axul longitudinal în procesul sinapsei. Perechile de cromozomi omologi formează bivalentii descoperiți de T. H. Montgomery (1901) și W.S. Sutton (1902).

Conjugarea cromozomilor are loc treptat dintr-un anumit punct și se extinde asemenea unui fermoar. În acest caz locii omologi corespund. Dacă cei doi cromozomi din bivalent nu sunt identici, conjugarea are loc doar între porțiunile omologe. Se presupune că forțele care determină conjugarea sunt de natură electrostatică sau hidrodinamică.

Formarea sinapsei este caracteristică numai meiozei. În zigoten are loc începutul sinapsei, care degradează în diptoten.

Complexul sinaptonemal (sinaptonul) este o structură axială tripartită:

- a) un element central (10-40 nm) situat de-a lungul celor doi cromozomi omologi conjugați;
- b) două elemente laterale (30-40 nm), câte unul pentru fiecare cromozom omolog;
- c) zona centrală (de 60-120 nm).

Sinaptonul are o mărime de 120-240 nm, iar la suprafață este înconjurat de fibre radiare care contactează cu membrana nucleară.

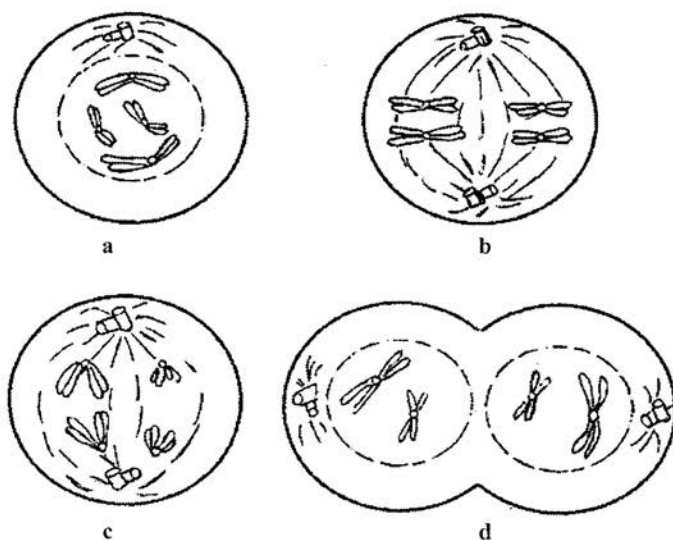


Fig. 59. Meioza. Diviziunea reduțională:

a – profaza I; b – metafaza I; c – anafaza I; d – telofaza I.

Funcția sinaptonului este de a menține cromozomii conjugați și de a asigura formarea chiasmelor (punctul de contact dintre cromozomii omologi) și a crossing-overului. În zigoten se sintetizează o mică cantitate de ADN (0,3% z-ADN).

În **pachiten** (din gr. „*pachys*” – gros) are loc condensarea și spiralizarea cromozomilor în procesul sinapsei. Cei doi cromozomi omologi formează o figură tetracromatidică, numită *tetradă*. Între cromatidele omoloage nesurori se evidențiază punctele de contact (chiasmele), considerate drept expresie citologică a crossing-overului.

Crossing-overul reprezintă schimbul de segmente dintre cromatidele nefice ale cromozomilor omologi (fig. 60).

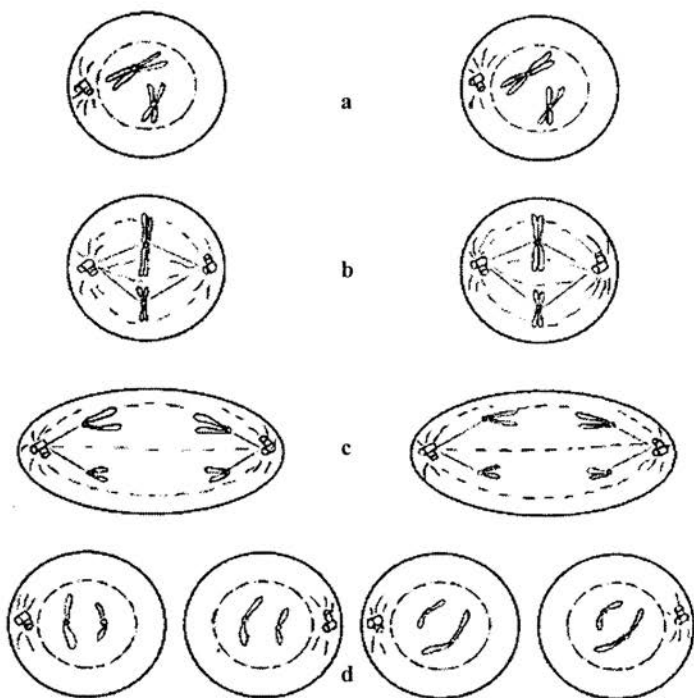


Fig. 60. Meioza. Diviziunea ecuatională:

a – profaza II; b – metafaza II; c – anafaza II; d – telofaza II

În pachiten continuă sinteza unei cantități mici de ADN (0,1% p-ADN). De asemenea, poate avea loc activizarea capacității de transcriere a cromozomilor și formarea cromozomilor „perle de lampă”.

În **diploten** (din gr. „*diploos*” – dublu) are loc clivajul cromozomilor pe toată lungimea lor și respingerea cromatidelor cromozomilor omologi. Acest proces începe în regiunea centromerului.

Cromozomii omologi (formați din 4 cromatide – 4 c) mai sunt uniți prin chiasme. Prezența chiasmelor este dovada crossing-overului. Spre sfârșitul diplotenului, sinaptonul se descompune, iar nucleolii se reduc în dimensiuni.

În **diachineză** (din gr. „de” – prin, de-a curmezișul; „kinesis” – mișcare) îngroșarea cromozomilor este maximă. Cromozomii sunt uniți doar prin câteva chiasme. Spre sfârșitul diachinezei, nucleolii și membrana nucleară dispar, începe fusul de diviziune.

Metafaza I se caracterizează prin dispariția membranei nucleare și formarea fusului de diviziune. Cromozomii bivalenți se îndreaptă spre ecuatorul celulei, formând placa metafazică. Cromozomii din perechi au o poziție simetrică: unul este orientat spre un pol, iar altul spre celălalt pol. Fibrele fusului de diviziune se fixează de cromozomii din bivalent. Între cei doi centromeri ai bivalentului are loc o respingere activă, ceea ce conduce la îndepărtarea cromozomilor omologi.

Anafaza I se caracterizează prin deplasarea spre polii celulei a câte un cromozom (din două cromatide) din fiecare bivalent. Cromatidele cromozomului se deplasează perechi, deoarece nu s-a produs diviziunea centromerului. În consecință, la polii celulei are loc reducerea numărului de cromozomi de la $2n$ la n (de la $4c$ la $2c$).

Telofaza I se caracterizează prin formarea a două nuclee haploide (n), iar fiecare cromozom conține două cromatide ($2c$). Nucleele își restabilesc structura, apare membrana nucleară, urmează citochineza. Ca urmare, se obține o diadă (două celule-fice).

După telofaza I urmează interfaza (interchineza), dar ea nu este obligatorie (la unele organisme poate să lipsească chiar și telofaza I, anafaza I fiind urmată de a doua diviziune meiotică).

După interchineză (în care numărul de cromozomi nu se schimbă) urmează a doua diviziune meiotică – diviziunea ecuatorială sau homotipică.

Diviziunea ecuatorială se aseamănă cu cea mitotică, însă se divid două celule haploide (fiecare cromozom constă din două cromatide – $2c$), care formează 4 celule haploide, cromozomii fiind alcătuiți dintr-o cromatidă – $1c$.

Această diviziune se derulează, de asemenea, în 4 faze: profaza II, metafaza II, anafaza II, telofaza II.

În **profaza II** are loc condensarea cromozomilor, degradarea nucleolilor și a membranei nucleare. Începe fusul de diviziune. Această fază lipsește la organismele care nu au trecut prin telofaza I și prin interchineză.

În **metafaza II** se termină formarea fusului de diviziune. Cromozomii se aranjează la ecuator, formând placa metafazică. Ei sunt fixați de fibrele fusului de diviziune în regiunea centromerului.

În **anafaza II** cromatidele-surori ale fiecărui cromozom se despart și se îndreaptă spre polii celulei.

În **telofaza II** cromozomii, ajunși la cei doi poli, se despiralizează. Pe parcursul acestei faze se restabilesc nucleele, apare membrana celulară și patru celule haploide (numărul de cromozomi monocromatidici este de două ori mai mic decât în celula-mamă). Aceste patru celule alcătuiesc o tetradă și sunt precursorii gameților. La animale ele se numesc spermatide (la masculi) și megaspori (la femele).

Celulele obținute în urma meiozei au o evoluție diferită. La masculi, toate cele patru celule vor deveni gameți-masculi sau spori, în consecința procesului de spermatogeneză (sau microsporogeneză). La femele, trei dintre cele patru celule avortează, transformându-se în nuclee polare, iar cea de-a patra celulă se transformă în gamet-femelă.

La plante, două dintre celulele tetradei (uneori toate patru) participă la formarea sacului embrionar, în care are loc formarea ovulului, a sinergidelor, a celulelor-antipod și a celulelor diploide centrale.

În concluzie: diferitor grupe de organisme le sunt caracteristice diverse tipuri de meioză:

1) *meioza gametică* (sau terminală) – în urma meiozei apar spermatozoizi și ovule care nu se divizează ulterior și sunt apte de fecundație (se întâlnesc la animalele superioare);

2) *meioza zigotică* (sau inițială) – în urma meiozei apar celule vegetale cu un număr haploid de cromozomi (se întâlnește la alge și ciuperci);

3) *meioza sporală* (sau intermediară) – în urma meiozei se formează mega- sau microspori haploizi, la dividerea ulterioară a cărora se formează gameți. Este o parte componentă a procesului general de sporogeneză (se întâlnește la plantele superioare).

Din cele menționate anterior se impune concluzia că meioza și mitoza se deosebesc esențial (vezi tabelul 10).

Semnificația biologică a meiozei:

- Asigură constanța numărului de cromozomi în cadrul reproducerii sexuate, micșorând de două ori numărul lor în celulele sexuale. În urma fecundației, în zigot, se restabilește de fiecare dată numărul diploid de cromozomi. În lipsa acestui proces, ar fi pusă în pericol însăși existența

speciei. De exemplu, la căsătoria unei femei cu un bărbat (ambii având câte 46 de cromozomi) copiii ar avea câte 92 de cromozomi, iar nepoții – câte 184 etc., până se va ajunge la infinit? Și invers, în acest caz părinții tinerilor căsătoriți ar fi trebuit să aibă câte 23 de cromozomi fiecare, iar buneii – câte 12,5 cromozomi. E bine cunoscut, însă, faptul că numărul de cromozomi este stabil pentru fiecare specie, această însușire fiind determinată anume de meioză.

- Asigură diversitatea (heterogenitatea) genetică ca rezultat al crossing-overului. Astfel, populațiile organismelor devin mai heterogene și, evident, se pot adapta mai ușor la condițiile mediului.

Tabelul 10

Deosebiriile dintre mitoză și meioză

	Mitoza	Meioza
1	Este caracteristică celulelor somatice.	Este caracteristică celulelor germinale.
2	În urma dividerii se obțin două celule diploide.	În consecința dividerii se obțin patru celule haploide.
3	Este compusă dintr-o singură diviziune.	Este compusă din două diviziuni succesive.
4	Profaza este de scurtă durată.	Profaza are o durată lungă (în comparație cu cea a mitozei) și este alcătuită din 5 stadii succesive.
5	Cromozomii omologi nu formează organizat bivalenți.	Cromozomii omologi în profaza I formează bivalenți.
6	Nu se formează sinapsa (complexul sinaptonemal).	În profaza I se formează sinaptonul.
7	De regulă, nu apar chiasme și nu are loc crossing-overul.	În profaza I are loc (cu o frecvență destul de înaltă) crossing-overul.
8	În profază nu se sintetizează suplimentar ADN.	În profază se poate sintetiza suplimentar o mică cantitate de ADN.
9	În anafază spre poli migrează câte o cromatidă din fiecare cromozom.	În anafaza I spre poli migrează câte un cromozom din fiecare bivalent.

6.5. Efectele biologice primare ale radiațiilor ionizante

1. Acțiunea radiațiilor ionizante la nivel atomic și molecular

Radiațiile ionizante constau din particule ionizante direct, indirect sau mixt. Particulele ionizante direct sunt particule încărcate electric (electroni, protoni, particule *alfa*) care au suficientă energie cinetică să producă excitări sau ionizări prin coliziune. Particulele indirect ionizante sunt particule neîncărcate, ce pot elibera direct particule ionizante. Fotonii energetici, ca razele X și *gama*, dau naștere la electroni secundari de diverse energii, prin efectul fotoelectric, efectul Compton și efectul formării de perechi. Electronii secundari își transferă energia prin excitări și ionizări. Neutronii energetici cedează energie în special prin coliziuni elastice cu nucleele de hidrogen, iar protonii își pierd apoi energia prin excitări și ionizări. Neutronii cu energii sub câțiva KeV și peste zeci de MeV își transferă energia prin reacții nucleare inelastice, care produc particule *gama*.

În general, când radiațiile ionizante traversează materia, se produce ejecția electronilor din atomii pe care acestea îi traversează, rezultând un ion încărcat pozitiv. Distribuția evenimentelor primare, respectiv ionizări și excitări de-a lungul traiectoriei particulei ionizante, variază în funcție de tipul de radiații. Separarea medie a acestor evenimente primare descrește cu creșterea încărcăturii și masei particulei.

Absorbția în țesuturi a energiei radiațiilor corpusculare sau electromagnetice este de scurtă durată. Absorbția energiei produce modificări în structura atomilor constituenți ai moleculelor biologice, modificări ce pot fi rapid reversibile sau care pot conduce la alterări funcționale și/ori morfologice ale organitelor celulare, celulelor, țesuturilor sau organismului întreg. Energia se absoarbe în cantități separate și discrete, distribuite întâmplător grupurilor de molecule ce se află pe/sau în vecinătatea traiectului particulei ori cuantei de radiații. În funcție de cantitatea de energie pe care o primesc, moleculele sunt ionizate sau excitate.

Calitatea fasciculului de radiații face ca ionizarea moleculelor să se poată produce în două moduri: direct și indirect.

Radiațiile corpusculare (particule α , β , pozitroni, mezoni, electroni accelerați) sunt încărcate electric și produc *ionizare directă*. Aceasta se realizează prin coliziuni ale particulelor cu electronii intraatomici și expulzarea lor din atom. Electronii expulzați, dacă au energie și viteză suficientă, pot produce ionizări secundare. Particulele încărcate străbat un anumit parcurs

în organism, în funcție de rapiditatea cu care particula își cedează energia. Cunoașterea mărimii parcursului fasciculelor corpusculare este importantă pentru înțelegerea efectelor biologice produse de radiații. O particulă α poate acționa numai din interiorul organismului, fiind capabilă să străbată doar o mică porțiune de țesut din locul de unde este emisă. De exemplu, țesutul critic pentru radiul depus în os este cel osos, și nu măduva hematogenă cuprinsă în spațiile trabeculare osoase. Contaminarea internă cu săruri de radium generează osteosarcoame, și nu hemopatii maligne. În mod similar, iradierea epitelului bronșic de către produsele de filiație ale radonului, prezente în atmosfera de lucru din exploatarea uranifere și din alte mine metalifere, conduce la creșterea incidenței cancerului pulmonar cu punct de plecare în celulele bazale ale epitelului bronșic și nu la alte modificări biologice majore.

Radiațiile electromagnetice (X și *gama*) și neutronii produc *ionizarea indirectă* a materiei pe care o străbat. Fotonii transferă o parte sau toată energia lor învelișurilor electronice; electronii care vor primi o energie mai mare decât energia lor de legătură vor fi expulzați. Aceștia, la rândul lor, vor produce ionizarea sau excitarea moleculelor vecine. Posibilitățile de interacțiune sunt dictate de energia cuantei electromagnetice inițiale. Astfel, fotonii cu energii până la 200 keV își pierd întreaga energie într-o singură coliziune cu electronii situați pe una din păturile exterioare ale atomului, electronii expulzați fiind numiți fotoelectroni – *efect fotoelectric*. Absorbția energiei prin efectul fotoelectric este neuniformă în diverse țesuturi ale organismului. Astfel, țesuturile dense (țesutul osos) eliberează mai mulți fotoelectroni la trecerea unui număr de cuante, comparativ cu țesuturile moi.

Fotonii cu energii mai mari de 200 keV interacționează cu electronii de pe orbitele profunde sau cu electronii liberi prin *efectul Compton*. Electronul ciocnit primește o parte din energia fotonului, fiind expulzat din atom (electron Compton), iar fotonul este împrăștiat și își cedează treptat energia prin ciocniri repetate cu alți atomi. În acest caz, doza absorbită este asemănătoare în țesuturile dure și în cele moi.

Fotonii cu energii egale sau mai mari de 1,022 MeV interacționează în câmpul electric perinuclear, formând perechi de electroni-pozitroni, care pot interacționa ulterior cu electronii altor atomi prin *efectul formării de perechi*.

Neutronii rapizi cedează energia prin ciocniri elastice cu nucleele altor atomi, din care elimină protoni ce produc ionizarea moleculelor. Neutronii lenți (termici), care au energie cinetică mică, prin ciocniri inelastice, își cedează energia, rezultând excitarea nucleului. Revenirea la starea fundamen-

tală a nucleului se face prin emisia unei cuante gama sau a unei radiații corpusculare. Aceste radiații, la rândul lor, pot determina ionizarea moleculelor cu care se ciocnesc. Dintre elementele chimice constituente ale organismului, hidrogenul este cel care captează neutronii termici (datorită mărimii asemănătoare a masei protonului de hidrogen și a neutronului), prin urmare iradierea țesuturilor moi, care sunt mult mai bogate în hidrogen, este mai mare decât cea a țesuturilor dure.

În mediile biologice, prin absorbția energiei radiațiilor ionizante, apar produse rezultate din interacțiunea cu apa celulară și extracelulară – *radioliza apei* –, cât și din *interacțiunea cu moleculele organice*.

Din radioliza apei rezultă radicali hidroxil liberi ($\text{OH}\cdot$), atomi de hidrogen (H^+), apă oxigenată (H_2O_2) și radicali hidroxiperoxidici ($\text{HO}_2\cdot$). Moleculele organice produc atomi de hidrogen, radicali organici liberi, neutri, anionici și cationici. Cei mai mulți dintre radicalii produși prin radioliza apei, interacționează în timp foarte scurt (de ordinul a 10^{-6} sec.) cu moleculele biologice, conducând la formarea de radicali organici similari celor produși prin acțiunea directă a radiațiilor ionizante.

Astfel, are loc *întrepătrunderea acțiunilor directă și indirectă a radiațiilor ionizante asupra moleculelor și celulelor*.

Rezultatul este producerea unor leziuni relativ stabile, care pot provoca alterarea funcțională și apoi structurală a celulelor, țesuturilor, organismului întreg.

2. Efectele biologice ale radiațiilor ionizante la nivel celular

Absorbția radiațiilor ionizante la nivel celular

În procesul de acțiune a radiațiilor ionizante asupra organismului viu se deosebesc câteva stadii:

1. **Fizice.** Se caracterizează prin absorbția de energie, ionizare. Durează 10^{-15} s.

2. **Fizico-chimice.** Are loc interacțiunea ionilor cu moleculele. Durează 10^{-6} s. Se formează radicalii liberi.

3. **Chimice.** Are loc interacțiunea radicalilor liberi cu moleculele, celulele și ADN. Durează secunde.

4. **Biologice.** Se manifestă prin moartea celulară, modificări genetice, mutații. Durează de la zeci de minute până la zeci de ani.

Stadiul fizic al acțiunii radiațiilor. Chiar dacă **stadiul fizic** al acțiunii radiațiilor (depozitarea energiei în țintele celulare critice) ar trebui să fie identic în toate celulele, acest stadiu este urmat de o serie de reacții biochimice,

care pot accentua sau diminua efectele biologice ale radiațiilor. Oxigenul este un modificador puternic al leziunilor radioinduse, care se poate reflecta prin moarte celulară. Proteinele care se leagă de ADN pot avea efecte radioprotectoare semnificative. Producerea de rupturi duble în ADN-ul deproteinizat este de 70 de ori mai mare decât în celulele intacte.

Radiațiile ionizante pot acționa asupra organismului în trei moduri: prin acțiune directă, prin acțiune indirectă și prin acțiune la distanță. În urma acțiunii directe a radiațiilor asupra organismului sunt lezate macromoleculele de importanță vitală (macromolecule, acizi nucleici), care suferă transformări datorită ionizării sau excitării directe. Acțiunea indirectă este declanșată de elementele ce apar în urma proceselor radiochimice. Mediul principal, în care se desfășoară procesele biologice, fiind apa, efectele apar ca rezultat al ionizării acesteia. Produsele de descompunere a apei (ioni sau radicali) acționează ca agenți oxidanți și reducători asupra unor componente esențiale celulare, perturbând buna desfășurare a proceselor biologice din aceste celule. Acțiunea la distanță se produce în urma iradierilor locale. Prin răspândirea în organism a toxinelor care apar în organul iradiat și prin reacțiile sistemului endocrin apar anumite efecte biologice asupra celorlalte organe neiradiate. Când materia vie este supusă unei iradiere astfel, încât solicitările pentru organism nu depășesc cu mult condițiile fiziologice normale și el poate reacționa încă în limitele funcționării normale, acțiunea radiațiilor are doar un efect funcțional. În acest caz, radiațiile pot avea un efect pozitiv; pentru situațiile când metabolismul este dereglat, iradierea produce o activare și stimulare temporară a metabolismului, realizând de cele mai multe ori o reglare metabolică. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că în anumite condiții de iradiere apare o intensificare a reacțiilor prin care se realizează procesele de sinteză.

Dacă prin iradiere sunt depășite limitele funcționale normale ale organismului, atunci are loc o dereglare a metabolismului care poate conduce la moartea celulelor, țesuturilor sau chiar a organismului, ca urmare a descompunerii sau distrugerii unor macromolecule de interes vital. În afara modificărilor produse de radiații, de ionizarea materiei și de perturbarea proceselor fizico-chimice, la nivelul fiecărui țesut sau organ se pot produce și modificări specifice, în funcție de structura și rolul fiziologic în cadrul organismului. Intensitatea efectelor biologice depinde nu numai de cantitatea de radiații incidente, dar și de radio-sensibilitatea organismului afectat. Pentru organismele superioare, când iradierile nu depășesc anumite limite, datorită factorilor lor de reglare neuro-hormonală, există posibilitatea de a se asigura adaptarea și

compensarea funcțiilor dereglate, refacerea țesuturilor și chiar regenerarea biologică a organismului. Variatele aspecte pe care le poate prezenta efectul radiobiologic nu pot fi explicate decât prin prisma unei abordări care să ia în considerare întreg complexul de reacții și procese ce au loc în organismul iradiat. Efectele produse de radiație la nivelul organismului depind în general de porțiunea din corp expusă și de doza eliberată. O doză de radiații, care acționând asupra unei suprafețe reduse a pielii produce manifestări echivalente unei arsuri, dacă este eliberată asupra întregului organism, conduce la moarte în câteva zile. Efectele produse de iradiere pot să conducă la manifestări clinice precoce sau tardive.

În sec. XIX au fost observate efectele nefaste ale radiațiilor ionizante asupra populației, dar din ignoranță nu se lua nici o măsură de precauție în utilizarea lor. Primele leziuni au fost descrise în 1896, de către Leppin, Daniel și Stevens. În 1902, francezii Bergonié și Tribondeau au elaborat legea generală a radiosensibilității celulare pe baza lucrărilor efectuate privind comportamentul iepurilor. În același an se va pune în evidență primul radiocancer de piele. În 1910, P. Marie obține radiocancer pe animale și în 1996, Brook și Sachs transformă celulele în cultură *in vitro* prin expunerea lor la radiații ionizante. Radiobiologii, care efectuau cercetări asupra celulelor procariote, aveau șanse pe viitor să studieze celulele eucariote, ale căror metode de cultură se dezvoltau rapid.

E cunoscut faptul că procesele ionizante și de excitare transformă moleculele și atomii. În celule unele schimbări inițiale pot avea consecințe mai mult sau mai puțin tardive. Dacă leziunile apărute în celule nu sunt reparate, ele pot împiedica dividerea sau reproducerea și să transforme celula, conferindu-i proprietăți inițiale. Aceste două modalități au consecințe totalmente diferite. Se expune existența celulară în sens radiobiologic, mai bine zis capacitatea celulelor de a crea clone. Putem afirma că leziunile celulare stau la baza radiopatologiei. Funcția majorității organismelor sau a țesuturilor mamiferelor nu va fi afectată atât de mult de pierderea unei mici cantități de celule, însă va fi afectat caracterul funcțional și țesutul. În aceste condiții se prezintă noțiunea de **pragul (începutul) acțiunii efectelor somatice**, ce conduce la moartea celulei, iar astfel de efecte le denumim „deterministe”, gravitația lor fiind determinată de nivelul dozei. Problema este de natură diferită pentru efectele genetice și carcinogenetice, unde o singură celulă transformată provoacă efectul. Durata absorbției radiației pe scară îngustă: 10^{-13} sec.

Reacțiile chimice inițiale. Elementele centrale inițiale sunt dotate cu proprietăți reactive ale energiei eliberate în mediu de către radiațiile ionizante.

Această energie apare sub formă de radicali liberi reactivi, a cărei durată este foarte scurtă: de la 10^{-9} până la 10^{-4} sec. Calea parcursă de radicalul liber OH° este de 10\AA în concentrație molară. Reacțiile menționate sunt rezistente la factorii fizici, cum ar fi: temperatura, presiunea etc. Această trăsătură le deosebește de reacțiile chimice obișnuite, a căror viteză este percepută de ecuațiile lui Arrhenius (viteza se dublează când temperatura crește la 10°C).

Reacțiile biochimice. Reacțiile date sunt străine expunerii la radiații ionizante și apar doar în primele faze. Simultaneitatea lor este numită deseori de anglo-saxoni „reacții sumbre”, deoarece ele nu au aport energetic. Reprezintă un tablou „idilic” al radiobiologiei fenomenelor rapide, întrucât expunerea nu este suficient de înaltă, pentru că doza eliberează un singur puls extrem de scurt și deseori reacțiile biochimice încep în timp ce expunerea continuă. Cazul expunerii cronice prezintă viteza proceselor biologice, necesare unor reacții fiziologice ce au loc în cadrul celulei. Totuși, aceste reacții sunt sensibile la condițiile de temperatură și presiune.

Michael G. Vicker, de la Universitatea Brème, Departamentul Biologie, din Germania, pune în evidență consumurile de doze mici 10^{-6}Gy mn^{-1} , fiind numite „reacție oxidativă”. Acest fenomen depinde de doza de până la $100 \times 10^{-6}\text{Gy}$. El se depistează în câteva minute după expunerea, ce durează mai puțin de o oră. Este transmis celulelor vecine prin intermediul unui mediator. Aceste acțiuni vor fi amplificate de către o cascadă de metaboliți de acizi arahidonici, care joacă un rol important în reparația leziunilor de ADN.

Leziunile și afecțiunile, determinate de expunerea la radiații, sunt rezultatul eliberării energiei radiante în țesuturile sensibile. Energia eliberată direct sau indirect la nivelul moleculelor de ADN din cromozomi poate conduce la formarea de leziuni care, la rândul lor, pot altera informația genetică conținută în cromozomi. Ca atare, este posibilă apariția mai multor tipuri de leziuni:

● **Moartea celulară:** alterările produse în lanțurile de ADN împiedică continuarea corectă a sintezei de proteine și a altor substanțe esențiale în celulă. Efectul de moarte celulară este detectabil dacă un mare număr din celulele unui organ sunt distruse de către radiații. Cu excepția embrionului în dezvoltare, acest efect este apănajul dozelor mari de radiații.

● **Împiedicarea intrării celulelor în diviziune:** dacă leziunea nu permite diviziunea normală a cromozomilor sau transmiterea informației genetice la celulele-fiice în momentul diviziunii, în acest caz activitatea și funcționalitatea celulelor este nealterată până în momentul intrării în diviziune. Țesuturile care se divid rapid, cum sunt pielea, măduva osoasă, celulele intestinului subțire, pot fi afectate funcțional încă din primele momente ale expunerii la

radiații. Efectele sunt semnificative numai dacă este afectat un număr mare de celule, de exemplu în cazul expunerilor accidentale la doze mari de radiații.

● **În cazul celulelor** lezate de radiații, dar care supraviețuiesc expunerii și sunt capabile să se dividă și să producă celule-fiice viabile, sunt posibile două consecințe mai importante: **afectarea țesuturilor germinale și carcinogeneza.**

Afectarea țesuturilor germinale face ca orice anormalitate în codificarea secvențelor de nucleotide din ADN-ul celulelor germinale să fie transmisă descendenților persoanelor implicate. Astfel, la copii ea poate apărea ca stare de boală sau anormalitate generată de imposibilitatea de a sintetiza anumite proteine ori enzime, sau sub forma unor sindroame clinice cu un anumit grad de severitate. Afectarea țesuturilor germinale se mai poate traduce prin imposibilitatea dezvoltării fătului (avort spontan).

Dacă celulele lezate se găsesc în alte țesuturi și organe, leziunile nu vor fi transmise descendenților. Mutațiile sau anormalitățile cauzate de radiații în ADN-ul acestor celule pot induce modificări în comportamentul sau proprietățile lor, astfel încât, de exemplu, celulele cu un ritm lent de diviziune se vor divide în mod accelerat, cauzând apariția unei tumori benigne sau maligne la nivelul țesuturilor sau organelor iradiate. Mecanismul carcinogenezei, ca urmare a expunerii la radiații, deși neelucidat, recunoaște modificări imunologice, de suprafață și ale altor proprietăți ale celulelor lezate.

În urma iradierii celulelor de mamifere cu 1 Gy radiații gama, Goodhead apreciază următoarele numere estimative pentru leziunile fizice și biochimice produse precoce:

- **Leziuni fizice inițiale:**

Ionizări în nucleul celular	~ 100 000
Ionizări directe ale ADN-ului	~ 2 000
Excitări directe ale ADN-ului	~ 2 000

- **Leziuni biochimice-selective:**

Rupturi simple ale ADN-ului	1 000
8-Hidroxiadenina	700
Lezarea timinei	250
Rupturi duble ale ADN-ului	40
Cross-links ADN-proteine	150

- **Efecte celulare-selective:**

Leziuni letale	- 0,2-0,8
Aberații cromozomiale	~ 1
Mutații	~ 10 ⁻⁵

Dificultatea majoră în studierea efectelor radiațiilor ionizante asupra ADN-ului este numărul mare de produse. Astfel, există sute de tipuri de produse radio-induse în ADN (Hutchinson, 1985).

Pe lângă formele simple de produse, în ADN sunt posibile combinații ale lor „în ciorchine” – clustere – și influențe din partea altor molecule din mediul celular. Nu toate tipurile de leziuni sunt la fel de importante pentru efectele celulare finale, care interesează în radioterapie și radioprotecție. Numărul de leziuni este diferit, iar procesele de reparare a lor decurg cu diverse rate și eficacități. Astfel, o parte din leziunile imediate pot fi de importanță minoră, în schimb altele pot domina consecințele radiobiologice. Dacă mai multe din tipurile de leziuni sunt de importanță comparabilă, este mai greu de apreciat rolul lor.

Reacții radiochimice. În materia vie, modificările atomice, care au loc în moleculele complexe, determină o serie de fenomene ce transferă consecințele iradierii de la nivel molecular la nivel celular, apoi tisular și, în sfârșit, la nivelul organismului, după o cronologie reprezentată schematic mai jos (fig. 61).

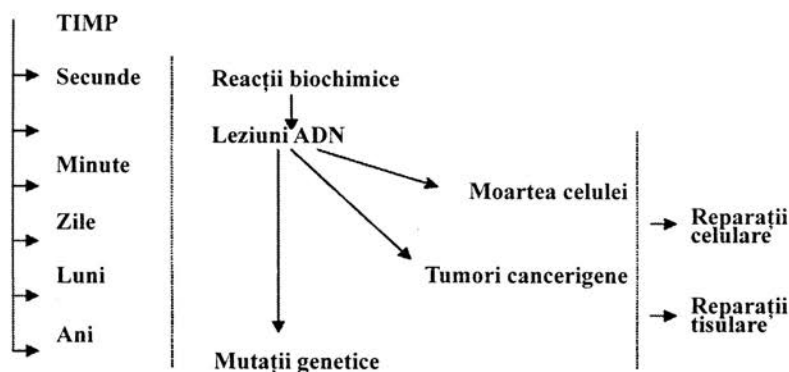


Fig. 61. Reacțiile biochimice.

Este o mare disproporționalitate între numărul de ionizări, excitări și efectul biologic. De exemplu, o doză de 10 Gy, care omoară celulele într-o mare proporție, cedează unui gram de țesut o energie de 10^{-2} J, ceea ce este echivalent cu o creștere de temperatură de circa $2,1 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$. Cu această energie se produc aproximativ 2×10^{15} ionizări pe gram, adică moleculele de apă sunt ionizate într-o proporție de 2×10^7 . Aceasta sugerează că ionizările și excitările au drept efect distrugerea stabilității macromoleculilor

biologice și implicit a celulelor cu efecte negative importante. Toate radiațiile ionizante dau din punct de vedere calitativ aceleași reacții radiochimice (fig. 62). Din punct de vedere cantitativ, însă, randamentul reacțiilor depinde de tipul radiației. Deoarece apa reprezintă componentul major al materiei vii, principalul efect primar al radiațiilor constă în radioliza moleculei de apă: $H_2O \rightarrow OH \cdot + H^+$, în care $OH \cdot$ și H^+ sunt radicali liberi, adică purtători de electroni singulari, deci foarte reactivi. Soarta radicalilor liberi astfel apăruiți depinde de mediul străbătut, de multe ori ajungându-se la formarea unor oxidanți foarte puternici: HO_2 sau H_2O_2 . Radiațiile acționează direct asupra biomoleculilor, excitându-le. Excesul de energie, pe care-l posedă o moleculă excitată, se eliberează fie prin emisie de fotoni, fie prin ruperea unei legături covalente, urmată de scindarea moleculei în doi radicali. Este posibil, de asemenea, ca energia în exces să fie transferată unei molecule vecine, care să reacționeze ca și cum ar fi fost iradiată direct. În mediul biologic există un număr mare de molecule, care prin reacție cu radicalii produși de radioliza apei pot forma peroxizi, ce se mențin mult timp după iradiere și provoacă efectele latente ale radiațiilor. Redistribuirea în urma iradierii a legăturilor de hidrogen are ca rezultat modificări de structură pentru proteine, putând conduce la inactivarea unor enzime. La nivelul acizilor nucleici, acțiunea radiațiilor se manifestă prin ruperi ale moleculelor, care pot fi simple, când se rupe o singură componentă a elicei, sau duble, când prin ruperea ambelor elice macromolecula se desface practic în două părți distincte. Efectele iradierii structurilor biologice variază în funcție de constituenții moleculari ai structurii iradiată, de tipul de celulă, țesut, organ iradiat, de starea fiziologică și de specie. O celulă este cu atât mai sensibilă la radiații, cu cât intensitatea proceselor sale de creștere este mai mare, cu cât se află într-un stadiu mai timpuriu al procesului de diviziune celulară și cu cât este mai nediferențiată. Mutațiile genetice sunt de cele mai multe ori letale, unele dintre ele fiind compatibile cu diviziunea celulară. Cele mai grave, din punctul de vedere al consecințelor, sunt mutațiile în celulele reproducătoare. Se disting două tipuri de modificări genetice, care reprezintă două grade diferite de alterare a moleculei de ADN:

- mutațiile genetice, care se datorează modificărilor la nivelul genei și se manifestă prin modificarea unui caracter controlat de gena respectivă;
- aberațiile cromozomiale, care pot fi evidențiate microscopic și se datorează unor ruperi ale moleculelor de acizi nucleici, urmate de recombinații.

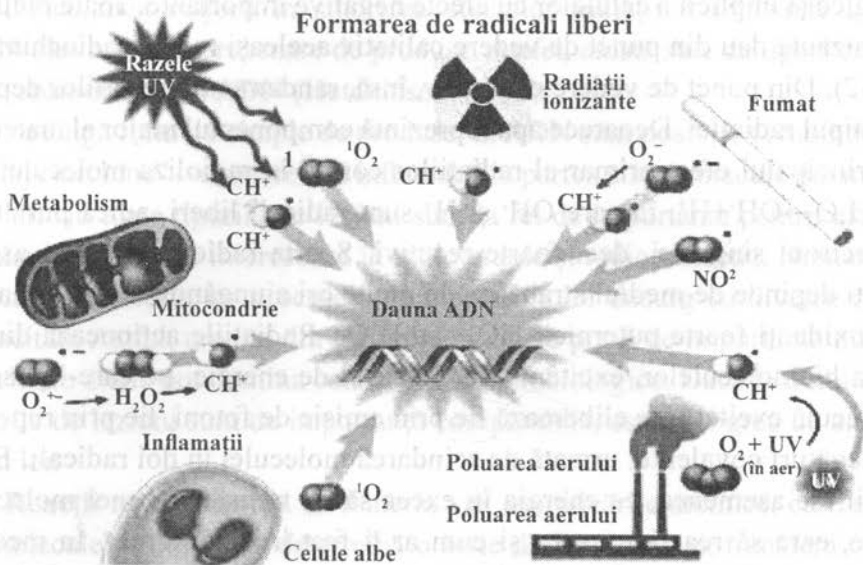


Fig. 62. Formarea de radicali liberi.

6.6. Leziuni produse de radiatiile ionizante asupra moleculelor ADN

Acidul dezoxiribonucleic (ADN) este materialul genetic al organismelor celulare și al celor mai mulți viruși. ADN-ul poartă informațiile necesare sintetizării directe a proteinelor și pentru replicare. Sinteza proteinelor este producerea de proteine necesare celulei sau virușilor pentru activitățile acestora sau pentru dezvoltare. Replicarea este procesul prin care ADN-ul se copiază pe sine însuși pentru fiecare celulă descendentă sau virus, păstrând informații despre sinteza proteinelor. În cele mai multe organisme celulare ADN-ul este organizat ca și cromozomii localizați în nucleul celulei.

O moleculă de ADN constă din două „lanțuri”, compuse dintr-un număr mare de substanțe chimice, numite nucleotide, prinse împreună pentru a forma un lanț (fig. 63).

Fiecare nucleotidă constă din 3 unități: o moleculă de zahăr, un grup de fosfați și una din următoarele molecule, numite baze: adenina, guanina, citozina și timina (fig. 63). Molecula de zahăr și cea fosfatică formează partea exterioară a elicei duble. Molecula de bază este legată de molecula de zahăr și orientată astfel încât cele două lanțuri care formează elicea ADN au moleculele-bază față în față, într-o configurație specifică, ce determină informația purtată de sistem. Între bazele aflate vizavi iau naștere legături de hidrogen,

care asigură forma macromoleculii. Cele două lanțuri se răsucesc unul în jurul celuilalt pentru a forma o elice dublă. Molecula rezultantă are un diametru de 2 nm pentru o lungime de câțiva cm. La o lungime de 1 mm de ADN revin circa 3×10^6 nucleotide.

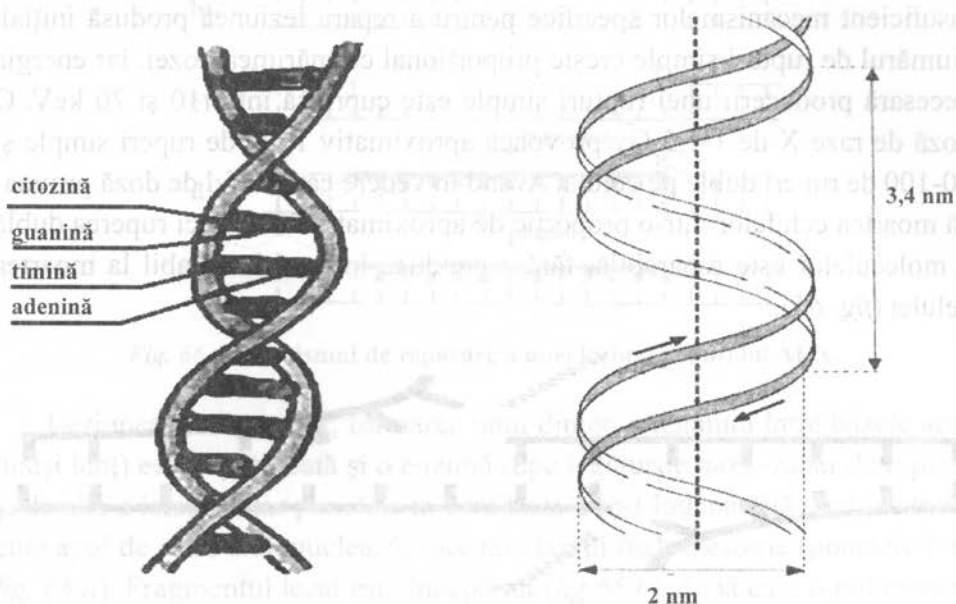


Fig. 63. Reprezentarea schematică a moleculei ADN.

Radiațiile ionizante acționează asupra moleculelor ADN fie în mod direct, prin ruperea lanțurilor moleculare, fie indirect, prin modificări chimice la nivelul nucleotidelor, datorită radicalilor liberi care iau naștere în celulă. Ruperea simplă a lanțului ADN apare atunci când un singur lanț al elicei duble este rupt. Cele două capete ale lanțului se depărtează și în spațiul astfel format pătrund molecule de apă care conduc la mărirea spațiului dintre lanțuri și la ruperea legăturilor de hidrogen (fig. 64).

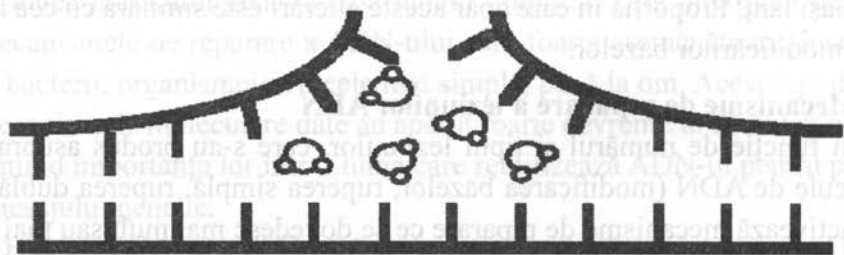


Fig. 64. Ruperea simplă a lanțului ADN.

Ruperea dublă a lanțului ADN apare atunci când ambele lanțuri ale unei molecule sunt rupte, la o distanță nu mai mare de trei nucleotide (*fig.65*). Ruperea poate fi datorată unei singure particule sau poate fi efectul interacțiunii cu două particule care traversează aceeași zonă într-un interval de timp insuficient mecanismelor specifice pentru a repara leziunea produsă inițial. Numărul de rupturi simple crește proporțional cu mărimea dozei, iar energia necesară producerii unei rupturi simple este cuprinsă între 10 și 20 keV. O doză de raze X de 1-1,5 Gy provoacă aproximativ 1000 de rupturi simple și 50-100 de rupturi duble pe celulă. Având în vedere că o astfel de doză provoacă moartea celulelor într-o proporție de aproximativ 50%, deci ruperea dublă a moleculelor este reparabilă, fără a conduce în mod inevitabil la moartea celulei (*fig. 65*).

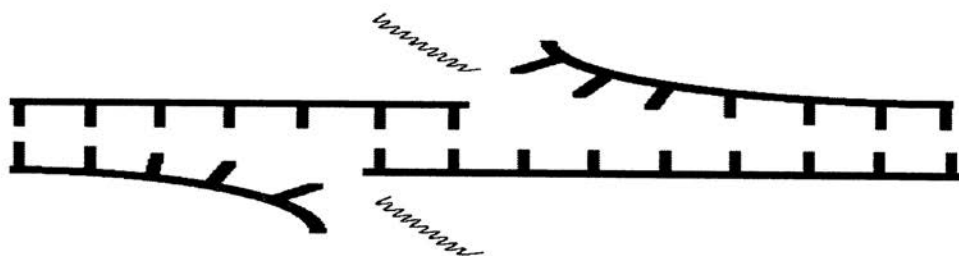


Fig. 65. Reprezentarea schematică a ruperii duble a unei molecule ADN.

Modificarea bazelor. Toate bazele, dar în special timina, pot fi hidrolizate de către radicalul OH^\cdot , formându-se hidroperoxizi în prezența oxigenului (ROOH). Proporția în care apar aceste modificări este de 2-3 la 10 rupturi simple ale lanțului ADN.

Distrugerea moleculelor de zaharuri. Ca și în cazul bazelor, zaharurile pot fi oxidate sau hidrolizate, producându-se eliberarea bazei și ruperea lanțului ADN sau crearea de legături între lanțurile ADN ori chiar în interiorul aceluiași lanț. Proporția în care apar aceste alterări este similară cu cea a apariției modificărilor bazelor.

Mecanisme de reparare a leziunilor ADN

În funcție de numărul și tipul leziunilor, care s-au produs asupra unei molecule de ADN (modificarea bazelor, ruperea simplă, ruperea dublă), celula activează mecanisme de reparare ce se dovedesc mai mult sau mai puțin eficiente.

Repararea prin „*tăiere și resinteză*” este modalitatea principală de reparare la toate organismele vii (*fig. 66*).

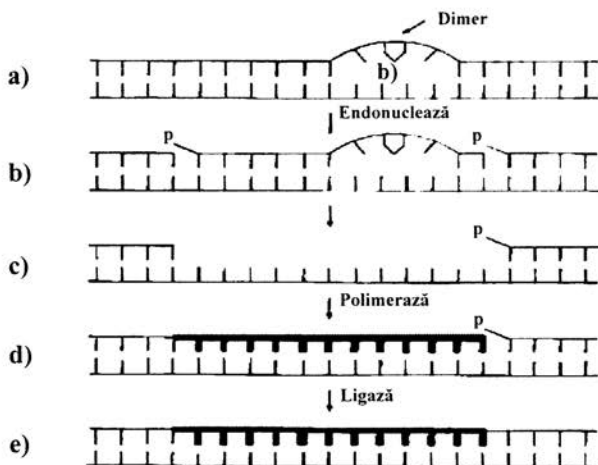


Fig. 66. Mecanismul de reparare a unei leziuni a lanțului ADN.

Leziunea (în acest caz, formarea unui dimer, o legătură între bazele aceleiași lanț) este identificată și o enzimă rupe legăturile bază-zahar de o parte și de alta a leziunii, iar punctele în care baza a fost îndepărtată sunt recunoscute apoi de către endonuclează, care taie lanțul fosfodiesteric (punctele P în fig. 66,a). Fragmentul lezat este îndepărtat (fig. 66,b), după care o polimerază sintetizează un nou segment, după modelul fragmentului de lanț paralel intact (fig. 66,c). În sfârșit, o ligază refacă legăturile dintre capetele lanțului inițial și ale fragmentului resintetizat (fig. 66,d). În concluzie, acest mecanism implică existența unor enzime specializate, pentru „recunoașterea” leziunilor și, respectiv, pentru repararea acestora.

Repararea fragmentului de ADN lezat se face plecând de la „modelul” dat de lanțul rămas intact, astfel încât posibilitățile de eroare sunt minime. Existența și eficacitatea unor asemenea mecanisme moleculare explică modul în care ADN-ul celular, care suferă mii de modificări zilnic, poate păstra integritatea mesajului genetic de-a lungul timpului. Este important de notat că mecanismele de reparare a ADN-ului sunt foarte asemănătoare, începând de la bacterii, organismele vii cele mai simple, până la om. Acest fapt denotă că mecanismele moleculare date au apărut foarte devreme în cursul evoluției, subliniind importanța lor într-o lume care reutilizează ADN-ul pentru păstrarea mesajului genetic.

Dacă celulele nu se divizează și ruptura afectează un singur lanț al moleculei ADN, întregul sistem de enzime implicate este activat pentru repararea lanțului lezat. Dacă diviziunea celulară este prea rapidă, celula își poate în-

cetini ciclul, până la blocare. Datorită întreruperii ciclului celular, diferitele sisteme de reparație pot avea timpul necesar pentru a reface mai mult sau mai puțin exact integritatea patrimoniului genetic, înainte de etapa extrem de importantă a replicării ADN.

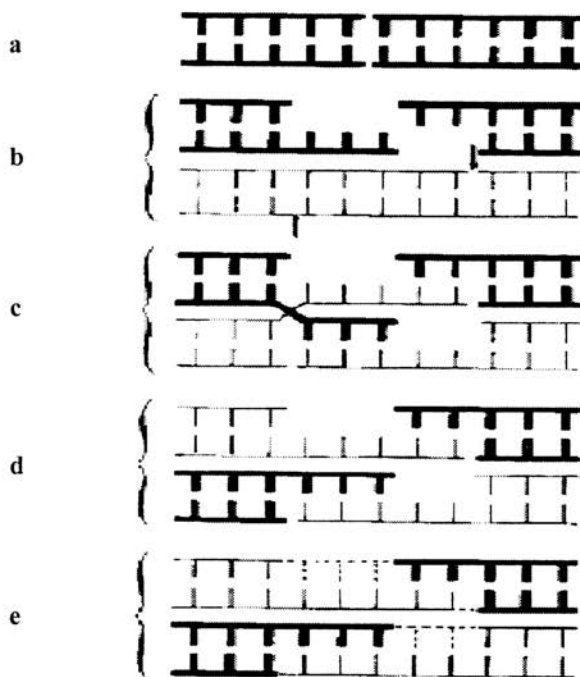


Fig. 67. Mecanismul de reparare a moleculei ADN în cazul ruperii ambelor lanțuri ale moleculei.

În cazul reparării unei rupturi ce afectează ambele lanțuri ale moleculei ADN unele dintre mecanismele utilizate pot conduce la o modificare a informației genetice, prin combinarea ADN-ului lezat cu o altă moleculă ADN, așa cum se poate vedea în mecanismul reprezentat schematic în figura 67. Ca și la mecanismul precedent, mai întâi, o enzimă taie porțiunea lezată a fiecărui lanț (fig. 67,b), după care o moleculă intactă se poziționează în vecinătatea moleculei lezate. Ambele lanțuri ale moleculei intacte sunt tăiate de către o endonuclează, în poziții similare cu cele ale moleculei lezate. Într-o etapă ulterioară (fig. 67,c) se produce un schimb reciproc între lanțurile duble ale celor două molecule, astfel încât, după separarea celor două molecule (fig. 67,d), fiecare să aibă câte un lanț intact și câte unul întrerupt. În final, pentru fiecare dintre cele două lanțuri se resintetizează porțiunea lipsă (fig. 67,e), repararea fiind completă. Acest mecanism, care poate avea drept rezultat modificarea patri-

moniului genetic, poate conduce la consecințe dramatice, cum ar fi activarea oncogenelor, responsabile de dezvoltarea tumorilor, sau inactivarea genelor antitumorale. De asemenea, este posibil ca celula să poată profita de ruperile duble ale lanțurilor ADN și de recombinația materialului genetic, pentru a produce o diversitate genetică. Dacă repararea este inefficientă datorită leziunilor prea mari ale moleculei ADN, celula intră în *apoptoză*, care reprezintă o veritabilă sinucidere celulară. Această moarte impusă elimină din organism celulele potențial mutante și permite evitarea proliferării celulelor anormale potențial canceroase.

6.7. Radiosensibilitatea celulară

În 1902, doi savanți francezi, Bergonié și Tribondeau, au elaborat legea generală a radiosensibilității celulare: „Celulele devin radiosensibile, deoarece transformarea lor cariocinetică este mai îndepărtată, morfologia și funcția sunt fixate definitiv, activitatea mitotică fiind mai intensă.”

Publicațiile ICRU nr. 30 au definit formalismul radiobiologiei când ea devine cantitativă. În domeniul supraviețuirii celulare, definit anterior, ICRU prezintă patru modele principale ale supraviețuirii celulare:

- Supraviețuirea monotopică și monotraumatică: o țintă, un traumatism

$$S_{1(D)} = e^{-\alpha D}$$

- Supraviețuirea politopică: mai multe ținte

$$S_{2(D)} = 1 - (1 - e^{-\alpha D})^n,$$

unde „n” – numărul de ținte.

- Supraviețuirea politopică modificată (prezența leziunilor letale)

$$S_{3(D)} = S_{1(D)} * S_{2(D)}$$

- Supraviețuirea liniar pătrată

$$S_{4(D)} = e^{-\alpha D} e^{-\beta D^2}$$

Aceste modele permit cuantificarea rezultatelor experimentale. Parametrii prezentați în publicații sunt următorii:

1. Doza $D_{37\%}$, doză ce reduce supraviețuirea inițială cu 37%.
2. Doza D_0 , doză ce reduce supraviețuirea cu e^{-1} în partea liniară de transformare logaritmică a curbei de supraviețuire.

3. Doza $D_{10} = \alpha^{-1}$ (ecuația 3), inversul pantei de origine a curbei de supraviețuire.

4. n : numărul extrapolărilor (numărul de ținte în sens teoretic), intersecția axei y a curbei de supraviețuire și extrapolarea părții liniare a transformării logaritmice a curbei de supraviețuire.

5. Doza D_q , doză a cărei extrapolare liniară a curbei de supraviețuire interceptă o paralelă cu axa x (doza), iar în reprezentare logaritmică intersectând 0 (supraviețuire unitară).

6. Între parametrii prezentați există un anumit număr de relații ordinare:

$D_0 = D_{37}$ unic în cazul supraviețuirii celulare:

$$D_q/D_0 = \log(n)$$

$$\alpha = 1/D_{10},$$

unde raportul α/β se exprimă în grade. Când $\alpha = \beta D$, atunci fenomenele pătrățice egalează fenomenele liniare.

Semnificația ecuațiilor date:

- Ecuația 2 prezintă panta nulă a originii. Conform acestei ecuații toate leziunile sunt reparabile.
- Alte trei reprezentări matematice au panta finită în origine și admit prezența leziunilor letale în general, dar ele lipsesc la nivel celular. Această deosebire este foarte importantă.
- Panta ecuației 4 este în descreștere.

În *tabelul 11* și în *fig. 68* sunt prezentate valorile numerice ale parametrilor ce caracterizează radiosensibilitatea celulară pentru unele tipuri de celule.

Tabelul 11

Parametrii supraviețuirii celulare (centi-Gray)

Populația	Test utilizat	D_0	D_q	n
Hela	<i>in vitro</i>	150	160	3,2
CHO (ovar hamster)	<i>in vitro</i>	200	210	3,0
CHL (plămân) sferoidă mică		170	400	10
CHL (plămân) sferoidă mare		170	900	100
Leucemie (șoarece)	<i>in vivo</i>	100	115	3,0
Măduvă (șoarece)	<i>in vivo</i>	100	100	2,5
Măduvă (șoarece)	<i>in vitro</i>	105	95	2,5
Măduvă (om)	<i>in vitro</i>	137	0	1

Limfocite (șobolan)	<i>in vitro</i>	150	0	1
Limfocite (om)	<i>in vitro</i>	400	0	1
Endoteliu	<i>in vitro</i>	200	160	2,3
Vasculară (șobolan)	<i>in vivo</i>	170	340	7
Piele (șoarece)	<i>in vivo</i>	135	350	-
Melanom (șoarece)	<i>in vitro</i>	133	190	4,2
Intestin subțire	<i>in vivo</i>	130	450	-
Stomac	<i>in vivo</i>	137	550	-
Spermatogonie	<i>in vivo</i>	180	270	-
Oocite	<i>in vivo</i>	91	62	2
Tiroidă (șobolan)	<i>in vivo</i>	405	400	2,8
Neuroni (om)	<i>in vivo</i>	130	90	2
Carcinom mamar	<i>in vivo</i>	340	230	10
Rabdomiosarcom	<i>in vitro</i>	120	300	10

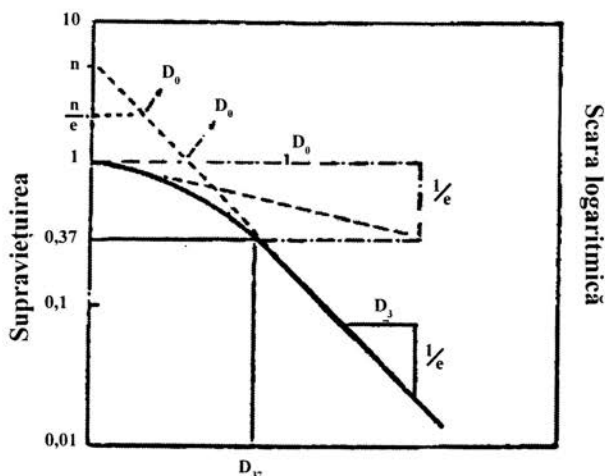


Fig. 68. Parametrii curbei de supraviețuire (ICRU 30).

Factorii radiosensibilității celulare. În cadrul populațiilor celulare aparent omogene, deseori este posibil de a izola mutații stabili cu radiosensibilitate celulară diferită. Care este originea acestei radiosensibilități?

● **Prezența peliculei proteice în jurul ADN-ului.** ARN-ul sau ADN-ul celulelor procariote (bacterii, viruși) sau celulelor eucariote (celelalte organisme) se află într-o membrană alcătuită din proteine speciale și histone. Acest înveliș proteic joacă un rol de protecție activ și pasiv în menținerea structurii tridimensionale a acizilor nucleici. Savanții din SUA au relevat fenomenul

dat asupra virusului din amestecul de tutun al diferitor mutații lipsiți de acest înveliș proteic. Dacă vom decortica acest înveliș proteic al virusurilor rezistenți, ei vor deveni radiosensibili. Învelișul proteic joacă un rol important ca tutore pentru partea monocatenară de ARN (fig. 69).

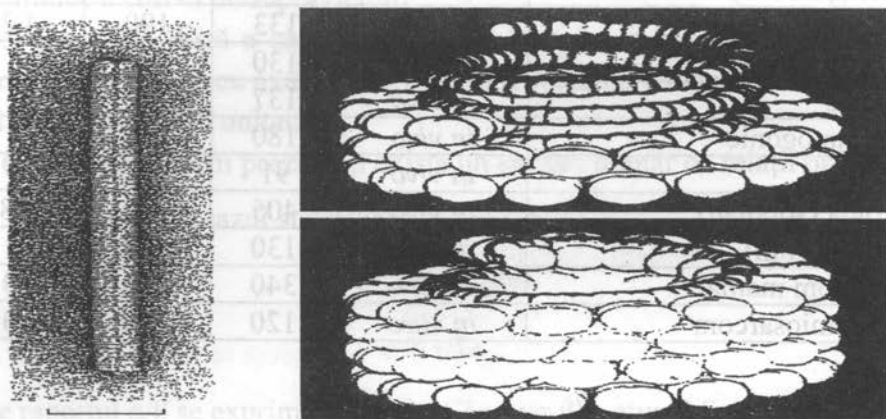


Fig. 69. Microfagia electronică a virusului mozaicului de tutun. Învelișul proteic al virusului mozaicului de tutun.

• **Conținutul de ADN în celule.** A fost demonstrat că celulele sunt grupate în patru familii în funcție de doza D_{10} . Totalitatea familiilor respective este prezentată în figura 70. Panta curbelor ce reprezintă aceste familii este determinată de conținutul de ARN sau ADN din celule. Diferența radiosensibilității dintre prima și a doua familie este determinată de prezența structurii secundare a acizilor nucleici: monocatenară și bicatenară. Diferența radiosensibilității dintre a doua și a treia familie este puțin explicată. Există diverse ipoteze: protecție proteică mai bună la familia a treia, mecanisme de reparație mai avansate. Diferența dintre a treia și a patra familie se explică prin ploeditatea celulelor din familia a patra, care dispun de mai multe interpretări ale informației genetice.

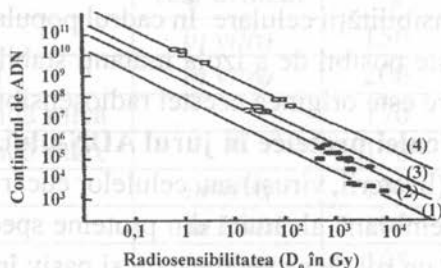


Fig. 70. Radiosensibilitatea celulară și conținutul de ADN.

● **Ploiditatea celulelor.** Acest factor este bine cunoscut de radioterapeuți, deoarece ploiditatea constituie baza radiorezistenței tumorilor umane. Experiințele lui Latarjet asupra levurei *Saccharomyces Cerevisiae* sunt ilustrate în figura 71. Panta curbelor de supraviețuire a celulelor haploide și diploide diferă prin dozele puternice. În acest caz teoria presupune că la doze puternice cele două curbe trebuie să devină paralele. Ploiditatea cauzează creșterea suplimentară „intrinsecă” a radiorezistenței levurei.

Se observă prezența enzimelor eficiente de reparație a celulelor mai evolute decât la celulele diploide. Aceste ipoteze au fost confirmate prin experiențele realizate de Berry asupra celulelor leucemice ale șoarecelui. Printre celulele supraviețuitoare se observă o linie cu o radiorezistență puternică unde se găsesc celule tetraploide. Curbele lor de supraviețuire sunt paralele cu dozele puternice. Astfel, tetraploiditatea celulelor le face mai radiosensibile.

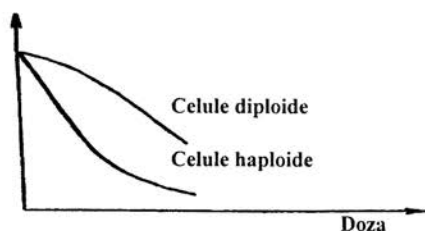


Fig. 71. Radiosensibilitatea celulară și ploiditatea.

6.8. Procesele de reparație celulară

Vom aborda parametrul determinant al radiosensibilității celulare, care nu va depinde de gravitatea sau cantitatea leziunilor create, dar care posedă capacitatea de a repara celulele în timp și în spațiu, aptitudine atât calitativă, cât și cantitativă. Pentru a evidenția importanța primordială a potențialului de reparație celulară asupra supraviețuirii, vom lua ca exemplu fagum T_2 și gena „u” (fig. 72), unde fagum T_{2U} este radiosensibil.

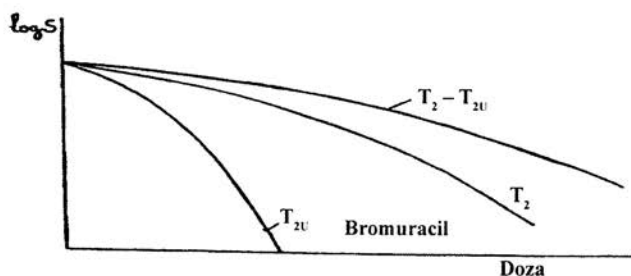


Fig. 72. Gena U cu fagum T_2 .

Dacă vom crește fagum T_2 și T_{2U} într-un mediu ce conține analogi structurali ai bazelor pirimidinice, ca exemplu bromuracilul, ambele vor deveni radiosensibile. Se constată că T_{2U} devine la fel de radiosensibil ca T_2 , dacă îl vom infecta cu bacterii simultan. Astfel vom stabili în T_{2U} sinteza unei enzime capabilă de a distruge diferite produse radioformate și vom determina reversia ARN-ului spre starea sa inițială. Acțiunea se va produce la nivel de timidină. Multe experiențe au confirmat aceste ipoteze în ceea ce privește rolul fundamental în reparația celulelor. Alți autori au arătat că după expunerea la radiații ionizante cu doze de 5Gy, celulele manifestă într-o manieră considerabilă activitatea lor de reparație.

În ceea ce privește omul, mulți autori consideră că genele de reparație ale ADN-ului sunt situate pe cromozomul 8. Experiențele efectuate asupra fibroblastelor de șoarece „SCID” (celule de șoarece ce suferea de imunodeficiență, lipsite de timocite și celule de tipul B), care au fuzionat cu fibroblastele umane normale, au depistat linii radiorezistente după selecția forțată (expunerea repetată la radiații X) a cromozomului 8 (fig. 73).

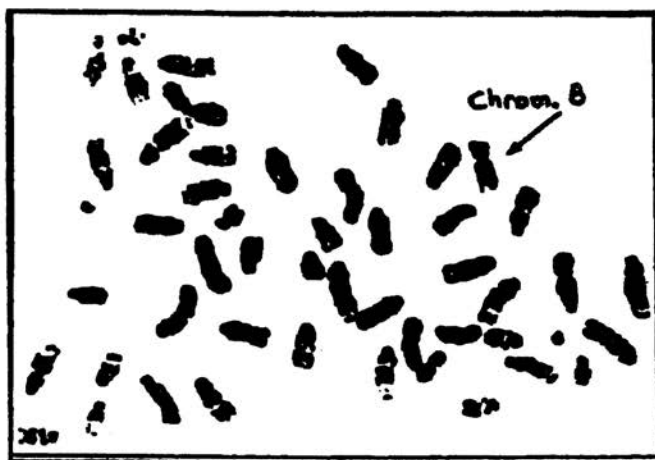


Fig. 73. Cariotipurile fibroblastelor radiorezistente.

6.9. Apoptoza sau moartea programată a celulei

Moartea imediată. După expunerea celulei la radiații ionizante cu doze considerabile de ordinul 10^4 Gy se observă încetarea funcționării celulei și citolizei, membrana celulară se stopează, celula devine picnotică și moare.

Moartea întârziată. După expunerea la radiații ionizante cu doze mici, celulele par a fi normale atât din punct de vedere morfologic, cât și funcțional. În cazul când celulele nu pot repara în timp leziunile, nu putem spune că are loc mitoza:

- celula crește în volum, dar nu ajunge să se dividă. Ea nu e capabilă să creeze o clonă, mai bine zis 2ⁿ celule la finele de n diviziuni celulare;
- celula se divide, dar acest proces se termină după câteva diviziuni din rezultatul precedent, în sens radiobiologic are loc „moartea întârziată”.

În momentul când celula a creat o clonă de 64 de celule (*fig. 74*), celula e considerată normală din punctul de vedere al supraviețuirii, totodată ea poate să fie anormală în plan cromozomic și să aibă loc etapa I de transformare celulară. Moartea întârziată explică diverse aspecte ale expunerii la radiații ionizante „*in vitro*” a tumorilor sau a țesuturilor sănătoase vecine.

Moartea celulei poate avea diferite aspecte. Capacitatea celulei de a crea o clonă este criteriul general reținut în elaborarea relațiilor doză-efect în radiobiologie. Moartea celulară poate fi accidentală sau genetic programată. Din punct de vedere formal *moartea programată* a celulei este considerată ca un mecanism indispensabil supraviețuirii. Este paradoxal de a constata că moartea celulei este implicată de o manieră limitată la nașterea și dezvoltarea celulelor. Ele intervin la nivel de descendenți germinali și la diferite faze ale dezvoltării embrionare. Moartea programată a celulei stă la baza morfogenezei și a metamorfozei. Ea exercită funcția de reglare „homeostază”, în relațiile cu capacitățile de regenerare a țesuturilor și poate fi unul dintre parametrii fundamentali în ceea ce privește controlul dimensiunii și al formei țesuturilor, organelor și organismelor normale.

Moartea celulei poate fi clasificată în două categorii mari:

- 1) necroza celulară;
- 2) moartea programată – apoptoza.

Necroza celulară. Intervine în cazul când celulele se confruntă cu circumstanțe diferite de condițiile sale fiziologice obișnuite. Agresorii potențiali pot fi:

- Hipoxia
- Inhibarea fosforilării
- Glicoliza
- Hipertermia
- Toxinele
- Dozele mari de radiații ionizante.

Principalele trăsături morfologice, ce caracterizează necroza, sunt: apariția unui edem citoplasmatic, o dilatație a reticulului endoplasmatic, un edem mitocondrial și condensarea cromatinei în „mici movițe”. Astfel, aceste le-

ziuni devin ireversibile. Structura celulară este complet distrusă. Totalitatea fenomenelor ce însoțesc necroza sunt ilustrate în *figura 74*.

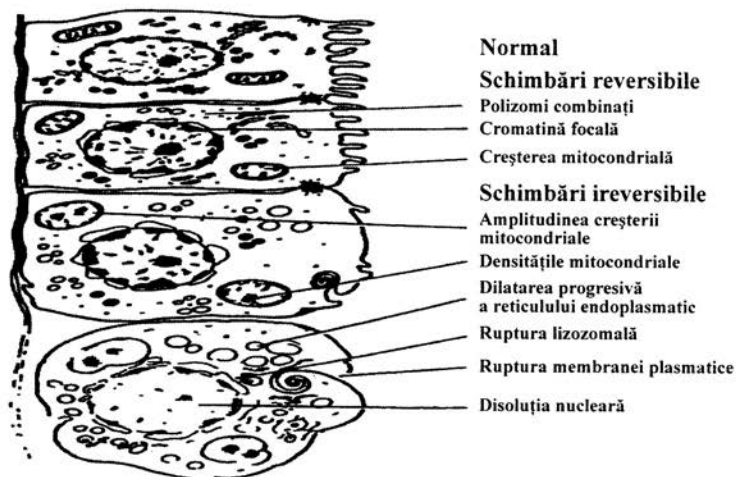


Fig. 74. Particularitățile morfologice caracteristice necrozei.

Moartea programată intervine în turnoverul fiziologic al țesuturilor compuse de celule ale căror durată de viață este limitată. Se manifestă, de asemenea, în timpul embriogenezei, metamorfozei și atrofierii țesuturilor de origine endocrină. Dezvoltarea normală a unui organ sau sistem se efectuează nu prin modelare, dar prin sculptură. În etapa I sunt produse celule în exces, dar în etapa a II-a majoritatea celulelor mor în funcție de criteriile particulare necesare pentru elaborarea definitivă a organului sau a sistemului analizat. Celulele endoteliale ale vaselor sangvine sunt supuse egal, astfel ca celulele tumorale care vor crește numărul de celule în apoptoză de fiecare dată când ele degenerază. Moartea programată a celulei pare a fi realizarea unui program conservat. Executarea acestui program de distrugere depinde de gradul de diferențiere a celulelor, de natura semnelor extracelulare și de prezența modulatorilor intracelulari, inclusiv și a celor oncogeni.

Caracterele morfologice ale apoptozei sunt redată în *figura 75*. Analizând microscopic, vom observa că aceste celule au citoplasma colorată. Legăturile intercelulare și structurile membranei sunt distruse. Ansamblul de celule se „contractează” și se fragmentează. Toate aceste fragmente sunt fagocitate de macrofagi. O particularitate esențială a apoptozei este caracterul său endotermic. Celulele având nevoie de energie, se știe că păstrează o normă de adenzină trifosfată (ATP). Această trăsătură este diferită de necroză, unde

distrugerea pompei ionice este considerată ca responsabilă de fenomenul dat. Celulele apoptotice sunt active metabolic: ele rețin potasiul (K) și resping sodiul (Na), nu provoacă reacții inflamatoare.

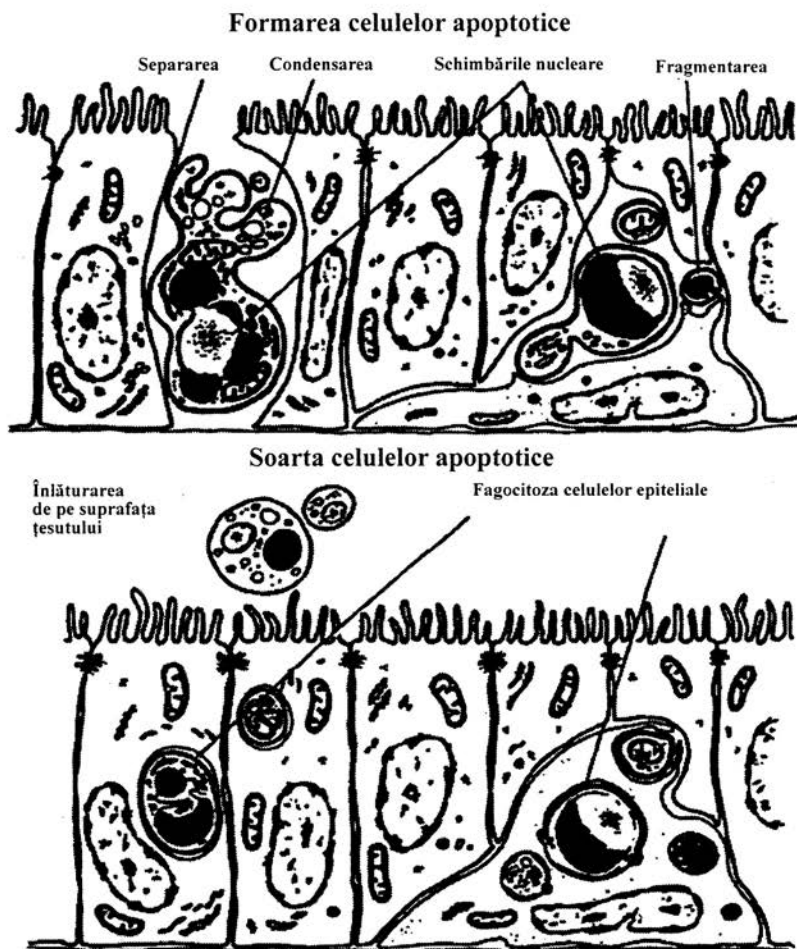


Fig. 75. Caracteristicile apoptozei.

În studiul „Supraviețuirea celulei”, inițiat de radiobiologi, este menționat faptul că criteriul pentru aprecierea supraviețuirii este capacitatea celulei de a forma o clonă după expunerea la radiații ionizante. În aceste condiții putem afirma că celulele au supraviețuit și s-au stabilit relații doză-efect. Criteriul dat nu are niciun punct comun cu „caracterul funcțional” al celulei, care constă în incapacitatea ei de a se divide, în pofida faptului că își îndeplinește funcțiile de bază. Radiațiile ionizante directe sau indirecte pot induce o varietate mare

de modificări în cadrul celulelor. Natura exactă a leziunilor ocazionale, provocate de către depunerea inițială de energie și de modificările biochimice, nu este complet clarificată. Nucleul celular este considerat de către radiobiologia ca o poziție sensibilă a celulei.

Celulele tumorale epiteliale, bogate în mitocondrii, expuse iradierii sunt mai radiorezistente față de celulele, care posedă o cantitate mai mică de mitocondrii. Radiosensibilitatea a fost determinată *in vivo* experimental. O altă diferență există între celulele musculare ale inimii, bogate în mitocondrii și radiorezistente, și limfocitele puternic radiosensibile și practic lipsite de mitocondrii.

Savantul Goldfeder a formulat ipoteza despre rolul activ al mitocondriilor în procesele de reparație. Dacă numărul mitocondriilor e mare, atunci sunt mai multe șanse pentru ca unele dintre ele să rămână neschimbate, ținând cont de faptul că acestea posedă ADN-matern, 16569 baze egale (pare).

Cât privește rolul membranei celulare în aceste mecanisme, el este încă puțin studiat. Este cunoscută, însă, acțiunea nocivă a radicalilor liberi la nivelul lor. Membrana celulară este constituită dintr-un strat dublu de fosfolipide, molecule ce dispun de un antipod hidrofil și un antipod hidrofob, alcătuite din două lanțuri de acizi grași polinesaturați, al căror antipod hidrofob este la suprafață. În cadrul acestor două straturi de fosfolipide se găsesc proteinele care asigură transportul metaboliților și transmiterea informației. Acestea sunt lanțuri de acizi grași nesaturați sensibili la acțiunea radicalilor. Atacul radicalilor OH⁻ ai membranelor celulare fosfolipidice declanșează o reacție în lanț „istovită”, pe de o parte, de existența dublei legături C-C la nivelul acizilor grași nesaturați, care facilitează delocalizarea electronului liber, iar pe de altă parte, de prezența oxigenului molecular O₂, care va împerechea ușor unul dintre electronii săi cu electronul liber delocalizat.

Experimentele cele mai semnificative și cele mai recente în acest domeniu au fost realizate pe baza timocitelor, cele mai radiosensibile celule ale organismului mamiferelor și ale organismului uman. Utilizând „un protector al membranelor nucleare”, numit *trolox*, care este un omolog solubil al vitaminei E, va fi posibil de a împiedica fragmentarea nucleului timocitelor, caracteristică apoptozei, după expunerea la radiațiile *gama* cu ⁶⁰Co (doza 1 Gy min⁻¹). Troloxul este eficace după expunerea la radiații ionizante. El nu acționează în calitatea de a captura radicali. Troloxul repară leziunile

membranei, în caz contrar, celulele mor. După faza apoptotică în celulă pătrunde un flux important de ioni Ca^{2+} . Trei ore după expunere timocitele, supuse iradierii, conțin o cantitate de ioni de Ca^{2+} de două ori mai ridicată, în comparație cu timocitele martor.

În cadrul celulei, membrana apare ca o țintă, deoarece ea reglează fluxurile ionice, care traversează celula, al cărui echilibru este necesar pentru supraviețuirea acesteia. Dacă aceste efecte se manifestă la nivel de citoplasmă și membrană celulară, se admite că ADN-ul nucleului celular este implicat în majoritatea efectelor celulare majore. O doză de 250 Gy eliberată în citoplasmă nu condiționează reproducerea celulei, astfel o doză de 1,5 Gy eliberată în nucleu împiedică diviziunea a 50% din celule (experiență realizată cu ajutorul a trei ace fine pe care se depozitează poloniu). Asemenea experiențe au fost efectuate cu tritium: apă titrată (repartizată omogen în toată celula) sau timidină titrată. Aceste experiențe au confirmat rezultatele precedente. Una dintre cele mai frapante descoperiri din anii precedenți a fost punerea în evidență a structurii flexibile a moleculei de ADN. S-au efectuat un număr mare de observări în cadrul radiosensibilității celulare asupra rolului de „ADN ambalat”.

Nu se ia în considerare natura leziunilor, ci apariția lor. Din numărul total de leziuni prezente doar 85% sunt reparate de către enzimele celulare (ce au funcția de catalizatori reductibili) în timp de câteva minute. Un procent nesemnificativ de celule sunt reparate timp de o oră.

Leziunile de susținere sunt responsabile de următoarele efecte:

1. pierderea capacității de replicare;
2. aberații cromozomiale;
3. mutații;
4. transformări dificile.

Studiul relațiilor doză-efect pot, prin urmare, să conducă la aceste efecte. Relațiile doză-număr de aberații cromozomiale ale celulei stau la baza dozimetriei biologice care este efectuată pe dicentrici și inele. Dozimetria biologică studiază translocațiile, al cărui avantaj constă în prelungirea timpului după expunerea la radiații ionizante. Metoda FISH (Fluorescent in situ hibridation) se utilizează pentru a le scoate în evidență. Metoda FISH a fost aplicată la 36 de persoane din Hiroșima în urma căreia s-a observat o bună corelație liniară între doză și numărul de translocații. Relațiile doză-efect la nivel celular sunt caracterizate prin capacitatea de replicare.

6.10. Efectele citogenetice ale radiațiilor ionizante

1. Aberațiile cromozomiale

Iradierea cu doze mici conduce, de obicei, la efecte biologice care se manifestă după o perioadă relativ lungă, uneori chiar la descendenții subiectului iradiat. Efectele biologice tardive, ca, de exemplu, cancerul și leucemia, care se manifestă la individul iradiat, poartă numele de efecte somatice. Efectele tardive care afectează descendenții subiectului iradiat sunt numite **ereditare** sau **genetice**. Studiul acestor efecte este extrem de dificil, datorită faptului că nu este posibilă realizarea unor experimente controlate, datele fiind obținute prin studiul statistic al unor iradieri accidentale și prin extrapolarea datelor existente la iradierea cu doze mari. De asemenea, se mai obțin informații în urma iradierii animalelor de laborator, însă rezultatele astfel obținute nu sunt întotdeauna corecte, datorită diferențelor anatomice și fiziologice dintre om și animalul de studiu.

Deregările cromozomiale pot să apară sub acțiunea dozelor mici și mari ale radiațiilor. Deși schimbările structurale pot fi cauzate de acțiunile directe și indirecte, majoritatea deregărilor cromozomiale se produc de la radiațiile ionizante indirecte. Rezultatele deregărilor constau în ruperea cromozomilor. Schimbările structurale de cromozomi care apar după iradiere sunt numite aberații (defecte) sau anomalii (abatere de la normă). Aberațiile cromozomiale care sunt cauzate de radiații pot avea loc și în celulele somatice. Dacă aberațiile cromozomiale nu sunt reparate înainte de sinteza ADN-ului, acestea se pot transmite în timpul mitozei și meiozei.

Deregările cromozomiale induse de către radiații, care apar înainte de sinteza ADN-lui, sunt numite aberații cromatidice. Dacă reparațiile cromozomiale nu au loc înainte de faza S a ciclului celular, ruptura cromozomială va fi replicată.

Odată cu aberațiile cromozomiale, celulele-fiice moștenesc defectele cromatidice. În timpul fazei S a ciclului celular, cromozomii se dublează. Cei doi cromozomi analogi constituie cromatidele-surori. În cazul în care numai o pereche de cromatide este deteriorată, doar o celulă-fică va fi afectată. Aberația cromatidică are loc după sinteza ADN-lui. Cele două tipuri de aberații cromozomiale primare includ rupturile solitare și rupturile duble.

Apariția unei singure rupturi duce la aceea că o parte din cromozom se rupe de la braț. În cazul în care porțiunea ruptă de cromozom nu se restabilește, aceasta formează o aberație numită *deleție terminală*; în cazul în care porțiunea se inversează și apoi se restabilește, aberația este numită *inversie*; în cazul în care aceasta se atașează la un alt cromozom, este numită *duplicație*.

Ruptura dublă reprezintă cazul în care două porțiuni din cromozom sunt rupte. Dacă cele două porțiuni rupte nu se restabilesc (nu revin la poziția inițială), atunci această aberație este numită *deleție interstițială*; în cazul în care porțiunile

rupte sunt reatașate la brațul cromozomului, se numește inversie; în cazul în care unul sau ambele porțiuni ale cromozomului se atașează la alt cromozom, se formează o aberație numită *duplicare*; atunci, însă, când are loc schimbarea locului secvențelor de cromozomi, se formează o aberație numită *translocație* (fig. 76).

Repararea aberațiilor cromozomiale este influențată de stadiul ciclului celular și tipul aberațiilor. Capetele rupte ale cromozomilor expun o forță puternică de coeziune. În timpul recombinării cromozomilor, de asemenea, are loc producerea aberațiilor, cum ar fi: formarea cromozomilor acentrici, formarea cromozomilor dicentrici (cu două centre) și formarea inelelor. Aceste anomalii sunt considerate aberații cromozomiale.

Moștenirea dereglărilor genetice totale, care sunt transmise prin aberațiile cromozomiale, depinde de tipul celulei, numărul și tipul de gene afectate. În cazul în care se produce vreo schimbare într-un cromozom, se observă modificări corespunzătoare și în componența ADN-lui. Această modificare în informația genetică se numește *mutație*.

	Rupturi	Recombinare	Replicare	Separarea în anafază
Ruptură solitară				
Ruptură dublă				
O ruptură în 2 cromozomi - translocație				
O ruptură în 2 cromozomi - dicentrici				

Fig. 76. Aberațiile cromozomiale

Cariotipul reprezintă harta cromozomilor care se utilizează pentru analiza citogenetică și cromozomială. Fotografierea nucleelor celulelor se efectuează în timpul metafazei, când are loc evidențierea fiecărui cromozom separat. Consecințele aberațiilor cromozomiale în majoritatea cazurilor nu pot fi determinate. În cazul în care se produce moartea celulelor, acest lucru este, în mod evident, un rezultat semnificativ. Numeroase mutații ale celulelor nu produc moartea acestora. Aceste modificări discrete ale celulelor pot fi critice pentru om. Mutațiile somatice au consecințe negative numai pentru persoana respectivă. Mutațiile genetice pot afecta organele de reproducere sau gameții părinților, care se pot manifesta în generațiile viitoare. Se presupune că efectele genetice sunt cumulative.

Datele citogenetice au demonstrat că, practic, radiațiile pot produce toate tipurile de aberații cromozomiale, care pot fi cauzate atât de dozele de iradiere scăzute, cât și de cele ridicate. Efectele radiațiilor asupra cromozomilor par a fi nespecifice și nu sunt binevenite.

2. Acțiunea radiațiilor ionizante asupra diferitor țesuturi și organe.

Afectarea țesuturilor interne

Toate organele și țesuturile corpului pot fi parțial afectate de radiații. Expunerile îndelungate la doze mari de radiații provoacă moartea celulelor și atrofia țesutului sau a organului. Aceasta, la rândul său, poate conduce la nefuncționarea (pierderea funcției) țesutului sau a organului ori rareori la restabilirea acestora. Reacția țesutului depinde de radiosensibilitate, de reproducere și de gradul de maturare a acestuia. Pielea și gonadele pot fi cel mai mult afectate în urma iradierii ionizante.

Acțiunea radiațiilor ionizante asupra pielii

În ultimul timp tot mai mult se utilizează radiațiile artificiale și radioterapia, iar pielea reprezintă unicul țesut care ne informează despre primele simptome de expunere la radiații. În decursul primilor ani de utilizare a tehnicilor radiologice, când tehnica nu era încă modernizată, se cunoșteau cazuri când razele X au acționat negativ asupra mai multor persoane, cauzând inflamație, eritem și arsuri la nivelul pielii. Razele X în doze mari induc eritem, care prezintă primul răspuns biologic la iradiere. Radiațiile induc eritem cutanat, similar cu cel observat după expunerea îndelungată la soare. Pielea este și un barometru al sănătății noastre, existând o strânsă legătură între starea fiziologică generală și starea pielii.

Potrivit expresiei unui savant dermatolog „pielea este fațada monumentală a corpului uman”, care nu constituie un simplu înveliș protector, ci este un organ cu structură complexă, cu multiple proprietăți și funcții. Pielea este alcătuită din trei straturi (fig. 77): superficial, numit și epidermă, în legătură directă cu mediul extern. Stratul de mijloc este derma, care constituie a doua componentă importantă a pielii și este separată de epidermă prin membrana bazală, care opune de asemenea o importantă rezistență pătrunderii din mediul extern a substanțelor străine și chiar a unor celule anormale (în tumori maligne) din epidermă. Derma este compusă din celule, vase sangvine, vase limfatice și nervi, toate acestea înglobate în țesutul conjunctiv, care reprezintă scheletul sau țesătura de rezistență a pielii și un strat subcutanat adipos. Al treilea strat al pielii este hipoderma, aflată sub dermă, care reprezintă un țesut conjunctiv ce unește pielea de mușchi și care alunecă grație stratului de grăsime. Alte structuri suplimentare ale pielii, care își au originea din dermă, includ foliculul părului, glandele sebacee (secreție uleioasă de grăsime), glandele sudoripare și receptorii senzitivi. Totalitatea straturilor de celule și a structurilor suplimentare sunt implicate în răspunsul organismului la iradiere.

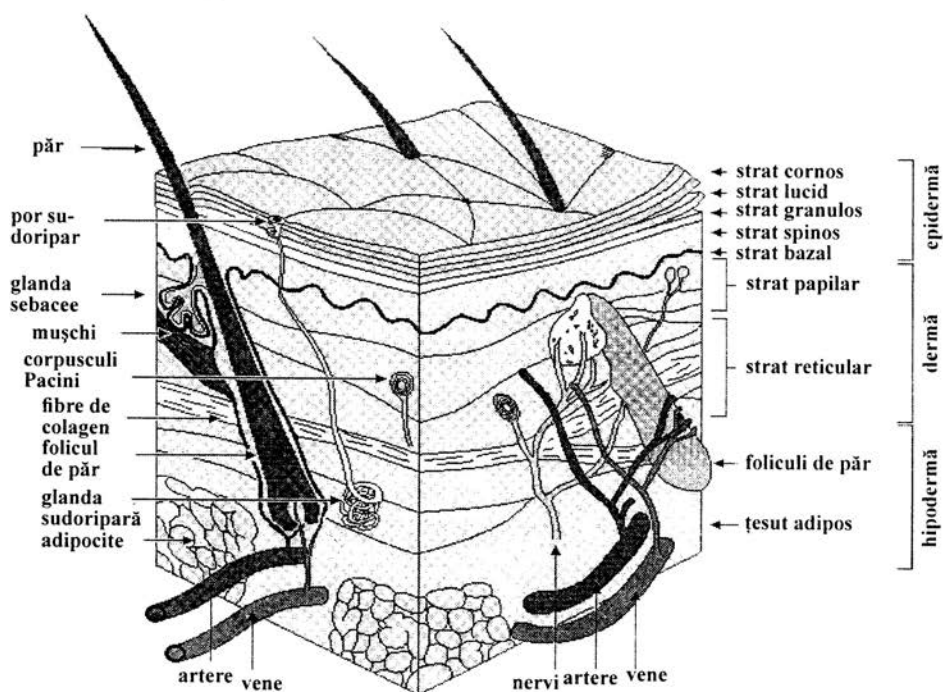


Fig. 77. Structura pielii.

În *tabelul 12* sunt prezentate efectele radiațiilor ionizante asupra pielii. Epiderma este compusă din straturi de celule mature nedivizate și celule divizabile imature (stratul bazal de celule). Suprafața pielii regulat pierde celule, care sunt permanent înlocuite cu celulele stratului bazal, aproximativ 2% pe zi. În decurs de 1-2 zile, de la o singură doză de 1-13 Gy, pe piele poate să apară un eritem ușor care inițial este urmat de un eritem mai grav în aproximativ 2 săptămâni. Înainte de introducerea unităților de măsură a radiațiilor, doza eritemului pielii a fost utilizată ca o măsură a cantității de iradiere primită de o persoană. Analizând datele persoanelor care au fost iradiate superficial cu raze X terapeutice, s-a constatat că doza necesară pentru a afecta 50% din oamenii expuși la radiații este estimată la aproximativ 6 Gy.

Tabelul 12

Efectele radiațiilor ionizante asupra pielii

Efectele acute	Efectele întârziate	Efectul asupra structurilor accesorii (suplimentare)
Eritemul	Atrofie	Epilare
Inflamație Descuamare uscată Descuamare umedă	Fibroză Hiper/hipopigmentație Ulcerație Necroză Cancer	Distrugerea glandelor sudoripare și sebacee

Eritemul cutanat este considerat ca răspuns imun la acțiunea dozelor mari de radiație. În cazul în care epiderma este expusă la doze moderate de iradiere, se observă o ușoară vindecare prin regenerarea acesteia, care constă în modificări întârziate ne semnificative. Totuși, expunerea la doze mari de iradiere provoacă modificări întârziate, ce includ atrofia, fibroza, modificări în pigmentație, ulcere, necroză (moartea țesutului) și poate cauza cancerul.

Dozele moderate pot cauza epilarea temporară sau alopecia (căderea părului), iar la doze mari, cu mare probabilitate, pot cauza epilarea permanentă. Glandele sebacee și cele sudoripare sunt considerate a fi relativ radiorezistente.

Este demonstrată corelarea dintre efectele expunerii la radiații ionizante și doză/timp (*tabelul 13*).

Efectele expunerii la radiații ionizante în funcție de doză/timp

Dozele	Suprafața iradiată	Expunerea internă	Tipul reacției sau dereglării
<1 Gy	Mică	Redusă	Nu este vizibil efectul
2-6 Gy	Mică	Redusă	Apariția eritemului în 1-2 zile după expunere; persistă până la 5-6 zile; reapar în fiecare zi încă câte 10-12. Numărul maxim pe zi – 18-20; persistă până la 30-40 zile. Pierderea temporară a părului la >3 Gy.
6-10 Gy	Mică	Redusă	Eritem mai sever cauzat de dereglarea celulelor bazale. Simptomele precoce sunt mai intense și pielea se restabilește cu întârziere.
15 Gy	Mică	Redusă ≈ 4 săptămâni	Eritem mai sever, cu descumare uscată și restabilire incompletă.
20-50 Gy	Limitată	Redusă ≈ 4 săptămâni	Eritem intens, dermatită acută în urma expunerii la radiație cu descumări, hipoplazia dermei și epidermei, dereglări vasculare și căderea permanentă a părului. La doză mai mare de 5 Gy (5,000 rad) începe ulceratiunea/necroza.
20 Gy	Măinile sau alte suprafețe mici ale corpului	Dozele mici (10-20 Gy), zilnice, timp de câțiva ani	Schimbări precoce sau intermediare nu se observă. Modificări tardive manifestate prin crăpături de piele, deformarea unghiilor, ulcere, posibil apariția cancerului.

Acțiunea radiațiilor ionizante asupra cristalinului

Cristalinul ochiului conține celule radiosensibile care pot fi deteriorate sau chiar distruse de dozele sporite de radiații. Deoarece organismul nu este capabil de a elimina în exterior celulele deteriorate, acestea se pot acumula în cantități mari, provocând **cataracte**. Formarea cataractelor cauzate de radiații este denumită radiație cataractogenă. Gradul de opacitate și șansa de apariție a acesteia sunt proporționale cu doza de iradiere.

Dozele de radiații trecute de limitele valorii prag induc cataractele și condiționează relația doză-răspuns. Valoarea prag este considerată a fi de apro-

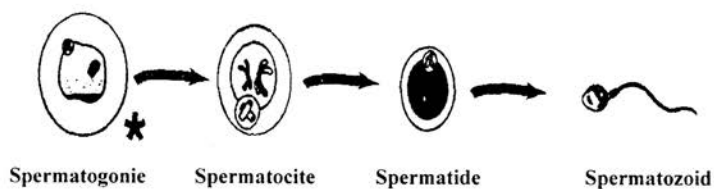
ximativ 2 Gy. La doze mai mari de 7 Gy toate persoanele iradiate vor face cataracte. În general, perioada de latență pentru formarea cataractei este de aproximativ 15 ani. Eficiența cataractogenezei scade la expunerea cronică. Cataractogeneza în prezent se întâlnește rar la persoanele expuse la radiații ionizante. Actualmente este aproape imposibil de a atinge valoarea prag. În timpul examenului fluoroscopic individul este expus la doze mari de radiații, ceea ce sugerează asupra faptului radioprotecției în timpul lucrului în această suprafață. Ar trebui prevăzute lentile protectoare pentru pacienți.

Acțiunea radiațiilor ionizante asupra gonadelor

Gonadele umane sunt extrem de radiosensibile. Dozele mai mici de 0,1 Gy cauzează observabil răspunsul organismului. Gonadele creează celulele embrionare (germinale) care controlează fertilitatea și ereditatea, iar răspunsul lor la iradiere a fost analizat foarte minuțios.

O mare parte din rezultatele cu privire la răspunsul gonadelor la expunerea cu radiații ionizante au fost obținute în experimentele efectuate asupra animalelor, iar unele dintre ele au fost obținute în urma analizării pacienților supuși investigațiilor terapiei cu radiații ionizante, victimelor accidentelor nucleare și a voluntarilor. Testiculele masculilor și ovarele femelelor reacționează în mod diferit la radiații din cauza evoluției diferite a maturizării celulelor germinale (*fig. 78*).

La masculi:



La femele:

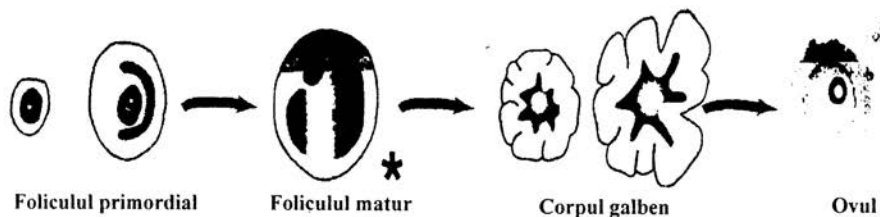


Fig. 78. Ciclul vital al spermatogoniei și ovogoniei.

Ovarele și testiculele produc celule embrionare, însă în rate și timp diferit privind felul în care acestea se dezvoltă de la celulele-stem la o celulă matură. Celulele-stem ale ovarului, oogonia, multiplicarea se produc numai la fetus. Se consideră că femela este mai rezistentă la radiații. Testiculele conțin spermatozoizi maturi, care sunt indivizibili, diferențiați și radiorezistenți; ele, de asemenea, includ spermatogonia imatură, cu dividere rapidă, nedivizată (întregi) și radiosensitivă. Principalul efect al radiațiilor asupra gonadelor este dereglarea și reducerea numărului de spermatogoni, care în cele din urmă conduce la depleția (epuizarea) spermatozoizilor maturi, un proces numit maturare de depleție. După expunerea testiculelor, perioada de fertilitate variază și este cauzată de radiorezistența spermatozoizilor maturi. În funcție de doză, această perioadă de fertilitate este urmată fie de o sterilitate temporară, fie de una permanentă. Sterilitatea este cauzată de pierderile de spermatogoni imaturi, de divizarea și înlocuirea spermatozoizilor maturi pierduți. O doză de 2,0–2,5 Gy produce sterilitate temporară, care poate dura mai mult de 1 an. O doză acută de 5,0–6,0 Gy cauzează sterilitate permanentă. În afară de sterilitate, un alt pericol îl constituie anomaliile cromozomiale, care pot fi transmise generațiilor viitoare. Datele despre perioada fertilă menționate anterior, care apar după expunerea la radiații, nu exclud posibilitatea dereglării cromozomilor. De asemenea, dereglările la nivelul cromozomilor și spermatogonia imatură nu pot fi excluse.

Radiațiile ionizante pot provoca anomaliile cromozomiale, care ar putea conduce la mutații în generațiile viitoare. Din acest motiv, se recomandă protejarea organelor genitale de la dozele mari de radiații.

Ovulele femelei, care sunt protejate de foliculi, au diferite dimensiuni: mici, intermediare și mari. Radiosensitivitatea ovarelor depinde: de rezistența foliculilor: puțin sensibili – foliculi intermediari; cei mai rezistenți foliculi mici și moderat sensibili – foliculi maturi. Ovulele nu se mai divid și le înlocuiesc pe cele pierdute în timpul ciclului menstrual. În timpul ovulației, ovulul este eliberat de un folicul matur. Aceasta este urmată de fertilizare sau de menstruație. După acțiunea unei doze moderate de radiații asupra ovarelor, există o perioadă inițială de fertilitate. Acest lucru este cauzat de rezistența moderată a foliculului matur. Perioada fertilă este urmată de o sterilitate temporară sau permanentă. Această sterilitate este cauzată de dereglările cauzate radiosensibilității intermediare a foliculului, care limitează maturarea și eliberarea lor.

O doză de 0,1 Gy poate să rețină începutul ciclului menstrual. Sterilitatea intervine în funcție de vârstă. De exemplu, fătul și copilul sunt deosebit de radiosenzitivi. Există o scădere a sensibilității până la vârsta de aproximativ 30 de ani, apoi ea începe să crească continuu cu vârsta. Dozele de 2,0 Gy produc sterilitate temporară. O doză acută de aproximativ 5,0-6,0 Gy va determina sterilitatea permanentă.

Trebuie de acordat o atenție deosebită șanselor de modificări genetice în funcționarea ovarelor după expunerea la radiații. Deși fertilitatea revine după expunerea la doze moderate scăzute, ar putea surveni anomalii cromozomiale la descendenți, chiar mutații nonvizibile, care se vor manifesta la generațiile viitoare. Din cauza dozelor acute mici primite de către pacienți și a dozelor cronice mici primite de personal, probabilitatea sterilității la sexul feminin cât și la sexul masculin este minimă. Cu toate acestea, după cum s-a menționat anterior, posibilitatea dereglării cromozomiale nu poate fi exclusă. Prin urmare, ovarele ar trebui să fie protejate împotriva radiațiilor.

Efectele hematologice ale acțiunii radiațiilor ionizante

În anii 1920–1930, periodic, se făceau examene ale sângelui în scopul monitorizării radiologice al personalului. În aceste examene au fost incluse numărul total de celule și cel de celule albe diferențiate. În prezent se cunoaște că doza minimă asupra întregului corp de aproximativ 250 mGy este suficientă pentru a determina depresia hematologică.

Sistemul hematopoietic include: măduva osoasă, sistemul sangvin, nodulii limfatici, splina și timusul. În țesutul măduvei osoase sunt incluse celulele parenchimatică, celulele-stem ale sistemului sangvin și celulele adipoase ale țesutului conjunctiv. La adulți sunt 2 tipuri de măduvă a spinării: roșie și galbenă. Măduva roșie include un număr mare de celule-stem împreună cu celulele adipoase, furnizoare de celule mature funcționale care se includ în circulația sangvină. La adult această măduvă este localizată în coaste, restul – de-a lungul oaselor, vertebrelor, sternului și craniului. Măduva galbenă, compusă în special din celule adipoase cu câteva celule-stem, nu prea este activă în circulația sangvină. Spre deosebire de adult, a cărui măduvă osoasă se găsește în locuri stabile, la făt măduva osoasă nu este distribuită uniform.

De asemenea, la majoritatea fetoșilor măduva osoasă este de culoare roșie. Principalul răspuns al măduvei osoase la acțiunea radiațiilor este scă-

derea numărului de celule-stem. Dozele mici de iradiere determină o scădere ușoară a celulelor-stem, dar care este urmată de recuperarea în termen de câteva săptămâni în urma expunerii. La doze moderate și mai ridicate depleția celulelor-stem este mai intensă, conducând fie la o perioadă mai lungă de recuperare a acestora, fie la scăderea recuperării. Se consideră că celulele-stem ale măduvei osoase sunt extrem de radiosensitive. Cele mai sensibile celule-stem sunt eritroblastele (celule precursorale ale celulelor roșii sangvine). Următoarele după sensibilitate sunt mielocitele (precursori ai globulelor albe sangvine). Cel mai puțin sensibile dintre celulele-stem sunt megakariocitele (precursorii trombocitelor). Expunerea la doze mici de radiații cauzează diminuarea numărului de celule-stem cu o recuperare rapidă. Rezultatele expunerii la doze de radiații moderat spre ridicate arată o descreștere a celulelor, fiind însoțită de o lentă sau incompletă recuperare. Cu excepția limfocitelor, celulele sistemului sangvin sunt considerate radiorezistente. Cu toate acestea, celulele sistemului sangvin indică gradul de deteriorare a măduvei osoase. Dacă există o scădere a numărului de celule-stem în măduvă, va exista o coincidență în scăderea numărului de celule mature circulante.

Coincidența dereglărilor (leziunilor) măduvei osoase depinde de sensibilitatea diferitor celulele-stem și de durata vieții fiecărei celule. Toate celulele sistemului sangvin au o limită în durata vieții, care variază în medie de la 1 zi (granulocite) la 120 de zile (eritrocite). După expunerea la radiații, limfocitele sunt primele celule care se reduc (dozele mai joase de 0,1 Gy). Apoi urmează neutrofilele (doze de 0,5 Gy sunt necesare pentru a determina scăderea). Cele mai radiorezistente sunt trombocitele și eritrocitele (doze mai mari de 0,5 Gy sunt necesare).

Dozele mici de radiații asupra limfocitelor cauzează o diminuare neesențială, care urmează cu o recuperare și o întoarcere la pre-expunerea valorilor limfocitare. După o doză moderată, limfocitele ajung aproximativ la zero în câteva zile, apoi urmează recuperarea cuprinsă în termen de câteva luni după expunere. În termen de o săptămână după expunere, neutrofilele revin la valorile minime. Recuperarea începe la scurt timp după aceea și în termen de o lună după expunere neutrofilele urmează o cale normală.

Pentru trombocite și eritrocite, dozele moderate provoacă efecte neesențiale. Dozele mari cauzează evident diminuarea celulelor. Pentru aceste celule, restabilirea începe în primele săptămâni după expunere, dar de obicei devine completă în câteva luni (*fig. 79*).

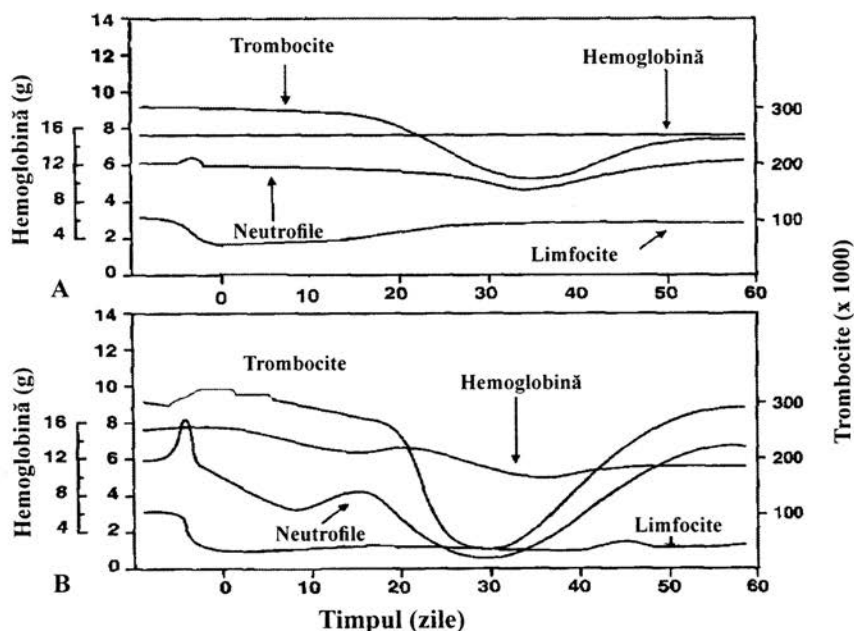


Fig. 79. Reacția sistemului hematopoietic la expunerea la radiații ionizante.

Scăderea esențială a numărului acestor celule poate avea consecințe negative asupra vieții. Mecanismele de apărare ale organismului se bazează pe proprietățile neutrofilelor și ale limfocitelor – combaterea infecțiilor. În cazul în care celulele date sunt diminuate, persoana va fi mai vulnerabilă la infecții. Trombocitele sunt necesare pentru coagularea sângelui. În cazul în care aceste celule sunt depliate, apare posibilitatea creșterii hemoragiei. Diminuarea eritrocitelor poate conduce la apariția anemiei.

Capitolul 7.

TOXICOLOGIA ELEMENTELOR RADIOACTIVE

7.1. Radiotoxicologia

Radiotoxicologia este o ramură a toxicologiei, care studiază originea fizico-chimică a radiotoxiciilor cât și legitățile interacțiunii lor cu organismele vii și mediul ambiant.

7.2. Agentul radiotoxic

Radiotoxic este considerat un agent nociv specific compus din unul sau mai multe elemente chimice nestabile (radioactive) și care combină efectivul de ionizare cu proprietățile chimice generale ale elementului dat.

7.3. Deosebirea dintre radiotoxicitate și toxicitatea chimică

1. Radiotoxicii, în afară de proprietățile chimice ale elementului, posedă și efectul de a emite continuu radiații ionizante indiferent de starea de agregare și transformările chimice suferite în procesul metabolizării.

2. Astfel de agenți vor produce efect indiferent de cantitate.

3. Odată ce agentul radiotoxic a pătruns în organism, efectul lui nu poate fi stopat sau neutralizat.

7.4. Caracteristicile agenților radiotoxici:

1. Nu sunt determinați de analizatorii senzitivi.

2. Sunt activi indiferent de concentrație și cantitate (de ord. 10^{-14} g/e(aer)).

3. Sunt activi, indiferent de starea de agregare și de transformările chimice suferite în timpul metabolizării.

4. Radiotoxicitatea ce manifestă atât timp cât elementul emite radiații ionizante.

5. Radiotoxicitatea depinde de proprietățile fizice ale nucleului (elementului) respectiv (tipul radiațiilor emise, energia).

6. Tabloul clinic al persoanelor intoxicate cu agenți radiotoxici se deosebește radical de cel al persoanelor intoxicate cu substanțe chimice stabile (obișnuite).

7.5. Capacitatea de acceptare a agenților radiotoxici de către organismul uman depinde de:

- doza limită de iradiere a organului critic;
- factorii biologici și eventuali de nutriție ai individului;
- factorii de transfer ecologic de la mediu la om;
- factorii intrinseci ai mediului receptor, care determină echilibrul și concentrația radionuclidului în acest mediu;
- factorii intrinseci ai deșeurilor, forma chimică a radionuclidului.

7.6. Etapele succesive ce permit estimarea „capacității de acceptare” pentru un anumit element radioactiv pot fi schematizate în ipoteza unui lanț alimentar:

- doza limită pentru organul critic (mRem/an);
- investiția limită a alimentului vector pentru individul critic (pCi/an);
- nivelul limită al elementelor vectoare (pCi/kg);
- nivelul limită în mediul receptor (pCi/ml);
- capacitatea de acceptare a mediului receptor (pCi/an).

$$J \times \text{kg}^{-1} \rightarrow \text{Sivert (Sv); } 1\text{Sv} = 100 \text{ rem}$$

Considerându-se Q – cantitatea de aliment consumat anual de către individ, $f(u)$ – doza de iradiere a organului de referință atribuită cantității Q , în funcție de nivelul (u) al contaminării mediului, iar D – doza care reprezintă iradierea unui grup de indivizi, valoarea acestei doze poate fi calculată prin următoarea relație:

$$D = \sum Q_i f_i(u)$$

Sursa de iradiere poate fi:

- mai multe radioelemente;
- mai multe surse de poluare;
- mai multe receptoare (apă, aer, sol).

7.7. Factorii de care depinde toxicitatea radionuclizilor pătrunși în organismul uman:

- tipul radionuclidului și energia radiațiilor emise;
- forma chimică (compuși solubili sau insolubili) a nuclidului;
- timpii de înjumătățire fizică, biologică și efectivă a radionuclidului.

Datorită acestor caracteristici, radionuclizii naturali și artificiali sunt clasați în patru grupe de toxicitate.

7.8. Clasificarea radiotoxicilor în conformitate cu gradul de toxicitate:

- grupa 1 – radiotoxicitate foarte mare (o parte din descendenții radionuclizilor naturali, printre care: radium-226, radium-228, plumb-210, precum și radionuclizii artificiali: plutoniu-239, plutoniu-240, plutoniu-241);
- grupa a 2-a – radiotoxicitate mare (iod-131, cesiu-137, stronțiu-89);

- grupa a 3-a – radiotoxicitate medie (carbon-14, fier-59, fosfor-32, radon-220, radon-222);
- grupa a 4-a – radiotoxicitate mică (hidrogen-3, tecnețiu-99, thoriu natural, uraniu natural).

Notă: Majoritatea radionuclizilor din grupele 1 și 2 sunt radionuclizi naturali și produșii lor de fisiune, care se consideră că prezintă un risc radiobiologic mare pentru om.

7.9. Clasificarea radiotoxicilor în funcție de solubilitate în mediul biologic

Radionuclizii pătrunși în organism, în funcție de modul cum sunt metabolizați, se divizează în:

- **transferabili** – radionuclizi în combinații solubile în mediul biologic, ce difuzează cu ușurință în organism; dintre aceștia menționăm: hidrogenul-3, carbonul-14, sodiul-22, radiul-226, cesiul-134, stronțitul-89, stronțitul-90, iodul-131 etc.;

- **netransferabili** – radionuclizi în combinații insolubile la orice pH din mediul biologic, ce practic difuzează puțin sau de loc în organism, chiar dacă au trecut de bariera intestinală. Este cazul plutoniului și al altor radionuclizi ce au ca organ critic ficatul, unde staționează foarte puțin după care sunt eliminați prin urină.

7.10. Căile de pătrundere a radionuclizilor în organismul uman și caracteristica lor

Radionuclizii pătrunși în organismul uman, în funcție de starea lor de agregare și compoziția chimică sunt metabolizați mai mult sau mai puțin. Astfel, radionuclizii din compușii insolubili staționează în organism, la nivelul tractului gastrointestinal, o perioadă de timp corespunzătoare tranzitului, după care sunt eliminați. Radionuclizii, cu conținut radioactiv mare, prezintă un risc major pentru organism, prin radiațiile emise, chiar dacă staționează un timp scurt. Uraniul, care constituie un caz particular, în mediul biologic, în funcție de forma chimică în care se află la pătrunderea în organism, se comportă fie precum elementul calciu, fie este eliminat repede din organism.

Radionuclizii ajunși în sânge trec apoi în țesuturi, unde sunt fixați sau eliminați, mai ales prin urină. În funcție de activitatea metabolică a țesutului, majoritatea radionuclizilor sunt reantrenați în sânge, fiind fixați din nou sau eliminați. În timp ce stronțitul radioactiv, odată fixat în sistemul osos, este metabolizat puțin, alta este situația cesiului radioactiv, care fiind fixat mai ales în

organe moi și în sistemul muscular este metabolizat intens, ceea ce conduce la eliminarea lui destul de rapid din organism.

Substanțele radioactive pot pătrunde în organism pe trei căi:

1. **respiratorie** – prin inhalarea aerosolilor încărcăți radioactiv dintr-o atmosferă contaminată;
2. **digestivă** – prin ingerarea de apă și alimente contaminate radioactiv;
3. **cutanată** – prin pielea intactă sau lezată.

Pătrunderea radionuclizilor prin intermediul sistemului respirator

Această cale este cea mai periculoasă din cauza suprafeței mari a alveolelor, care constituie aproximativ 100 m^2 , ceea ce depășește de 50 de ori suprafața pielii. În timpul unei zile de muncă omul inspiră circa 20 m^3 de aer, pe când apă consumă numai 2-2,5 litri. Totodată, substanța radioactivă care a pătruns pe această cale se absoarbe foarte rapid.

Radioactivitatea aerului poate fi condiționată de gaze radioactive de aerosoli, praf, ceață, fum. Cantitatea de radionuclizi care se va reține în sistemul respirator depinde de dimensiunea particulelor, de minut-volumul și frecvența respirației. Soarta de mai departe a radionuclizilor pătrunși în sistemul respirator depinde de dimensiunile lor, de particularitățile fizico-chimice și de transferabilitatea acestora în organism. Radionuclizii transferabili, de obicei, timp de zeci de minute, se reabsorb în patul sangvin, nimerind astfel în mediul intern al organismului. Mai departe, în procesul schimbului de substanțe (metabolismului), ei se depun în anumite organe și sisteme sau se elimină. Substanțele netransferabile sau puțin transferabile, care s-au sedimentat pe suprafața căilor respiratorii superioare, sunt eliminate împreună cu mucusul în nazofaringe, după aceasta pot pătrunde în sistemul digestiv. Particulele care s-au sedimentat în alveolele plămânilor sunt captate de fagocite, fiind înlăturate, sau migrează în ganglionii limfatici regionali, eliberându-se de ele în decurs de câteva luni ori ani, fapt pentru care considerăm plămânii ca organ critic în cazul inhalării substanțelor netransferabile sau puțin transferabile ca plutoniul, thoriul sau cesiul.

Pătrunderea radionuclizilor prin intermediul sistemului gastrointestinal

A doua după importanță cale este pătrunderea radionuclizilor cu apa și alimentele. Alimentele pot fi poluate cu substanțe radioactive artificiale, care prin intermediul lanțurilor biologice nimeresc pe culturile agricole, în organisme animalelor și în final în produsele alimentare. În cazul pătrunderii în organism a substanțelor radioactive cu ajutorul apei și produselor, unele

segmente ale tubului digestiv absorb o cantitate mai mare de energie eliberată de particule sau cuante. Soarta ulterioară a substanțelor radioactive pătrunse în sistemul digestiv depinde de transferabilitatea lor pentru mediul sistemului digestiv, care se caracterizează prin diferiți indici ai pH. De exemplu, mulți radionuclizi transferabili alcalini și transuranici ca plutoniul la pH intestinului se transformă în hidroxizi nesolubili. Este posibilă și transformarea inversă, când substanțele relativ rău transferabile în apă, în mediul lichid al tractului gastrointestinal se transformă în componente transferabile, care ușor sunt absorbite prin intermediul epitelului intestinal. În organism pătrund numai o parte din radionuclizii ce au nimerit în sistemul digestiv, o mare parte dintre ei tranzitează, fiind eliminați din intestin.

În timpul aflării radionuclizilor în tractul digestiv are loc iradierea intestinului și a organelor adiacente, particulele α și β iradiază numai peretele intestinal, pe când cuantele γ ajung până la alte organe interne amplasate în cavitatea abdominală și a cutiei toracice. Atât substanțele γ -active netransferabile, cât și cele puțin transferabile iradiază organele abdominale timp de aproximativ 30 de ore. Apoi ele sunt eliminate împreună cu fecalele. Acțiunea substanțelor β -active se limitează aproximativ ca și la cele γ -active. În cazul pătrunderii substanțelor transferabile o mare parte din ele trece bariera intestinală și cu ajutorul sângelui sunt repartizate în diferite organe și țesuturi.

Pătrunderea radionuclizilor prin intermediul țesutului cutanat

Cea mai puțin studiată cale privind pătrunderea substanțelor radioactive este cea prin piele. Pielea intactă până nu demult se considera ca barieră efectivă împotriva radiațiilor ionizante. Recent a fost stabilit că radionuclizii ca și alte substanțe în stare lichidă sau gazoasă pot pătrunde prin pielea animalelor și a omului foarte rapid în cantități mari. Viteza pătrunderii în organism a vaporilor de oxid de tritium și a iodului în stare gazoasă prin intermediul pielii intacte este comparabilă cu viteza pătrunderii acestor substanțe pe căile respiratorii. Cantitatea de plutoniu în formă de compuși solubili în apă, care pătrunde în organism în urma contaminării pielii, nu este mai mică decât în cazul pătrunderii pe cale digestivă. În cazul băilor cu radon timp de 20 de minute în organism pătrunde prin piele până la 4% de Rn.

Permeabilitatea pielii crește rapid în cazul acțiunii multor factori chimici, spre exemplu a solvenților cu efect degresant, mai ales în cazul lezării stratului cornos al pielii, care joacă un rol de barieră. În condiții de producere în cazul prezenței fisurilor, excoriațiilor, echimozelor crește pericolul de pătrundere a radionuclizilor în organism prin piele.

O influență considerabilă asupra intensității absorbției subcutanate a radionuclizilor are temperatura și umiditatea mediului ambiant.

Radionuclizii, pătrunși prin intermediul pielii, condiționează pericolul de iradiere a pielii și a acelor organe interne unde sunt transportați pe cale sangvină. În cazul evaluării iradierii pielii, de obicei, se limitează la determinarea dozelor, care au fost primite de stratul bazal al pielii aflat la adâncimea de 50-150 μ , unde sunt concentrate celulele-stem și de proliferare. În ultimul timp s-a stabilit și importanța calculării iradierii și a straturilor mai profunde ale pielii, în zona hemo- și limfocirculației, care asigură schimbul de substanțe în celulele pielii.

Leziunile organelor interne produse de radionuclizii care au pătruns prin piele nu se deosebesc după caracter de cele care se observă în cazul pătrunderii prin tractul digestiv sau prin sistemul respirator și sunt legate nemijlocit de doza de iradiere și de repartizarea în țesuturi și organe.

Resorbția radionuclizilor prin intermediul pielii intacte e mai mică de 200-300 ori decât în cazul pătrunderii prin intermediul tractului digestiv și, de obicei, nu joacă rol esențial. Excepție fac nitratul de uraniu, oxidul de tritium, iodul. În cazul lezării pielii substanțele radioactive solubile (transferabile) repede sunt absorbite în lichidul tisular și în sânge.

Pătrunderea izotopilor radioactivi prin intermediul plăgilor prezintă un pericol major.

Nimerind în mediul intern al organismului, substanțele radioactive se repartizează diferențiat în organe și țesuturi.

7.11. Comportamentul (repartizarea și metabolizarea) substanțelor radioactive în organismul uman

Soarta substanțelor radioactive care au pătruns în organism depinde de proprietățile și originea lor chimică. Unele dintre ele, în formă de soluții, sunt eliminate cu urina, altele se pot reține timp mai îndelungat.

Există trei tipuri de bază de repartizare a radionuclizilor în organism:

1. scheletal;
2. reticuloendotelial;
3. difuz.

Tipului scheletal îi este caracteristică acumularea radionuclizilor din grupa alcalino-pământoase – Ca, Sr, Ba, Ra, care se acumulează în zonele de creștere a oaselor, de asemenea și unii compuși ai plutoniului și thoriului, se rețin în țesutul osos.

Repartizarea reticuloendotelială este caracteristică pentru radionuclizii din grupa alcalino-pământoase rare – Ce, Pr, Pm, de asemenea pentru Zn, Th, Am și elementele transuranice.

Conform tipului difuz se repartizează așa elemente alcaline ca: K, Na Cs, Rb, de asemenea H, N, C, Po și altele. Sunt cunoscute unele cazuri de înaltă selectivitate a repartizării. Spre exemplu, izotopii iodului se acumulează exclusiv în glanda tiroidă.

Probabil, radionuclizii organotropi sunt mai periculoși decât cei difuzi din cauză că concentrația lor în țesuturi, precum și dozele din țesuturi în cazul condițiilor egale sunt mai mari.

În procesul transportării și metabolizării radionuclizii se rețin în acele țesuturi, în componența cărora există elemente (izotopi) stabile identice cu cele ale radionuclizilor analogi după proprietățile chimice. Ținând cont de faptul că componența chimică a principalelor organe și țesuturi la momentul actual este bine studiată, cu aproximație se poate presupune în ce țesuturi sau organe vor ajunge un element (radionuclid) sau altul.

Procesele de trecere a radionuclizilor din sânge sau alte lichide în organe și țesuturi se termină peste o anumită perioadă de timp. De exemplu, plasma sângelui se purifică de elementele care se depozitează în schelet – Ca și Sr – în decurs de 4-10 ore. Iodul apare în glanda tiroidă peste câteva minute după introducerea parenterală, dar transferul lui deplin din patul sangvin în glanda tiroidă se finalizează în timp de 10-15 ore. Uraniul este eliminat din sânge timp de 12 ore.

În afară de macrorepartizarea radionuclizilor descrisă mai sus trebuie de luat în considerare și microrepartizarea lor în organele și țesuturile animalelor și ale omului.

Prin metoda autoradiografică a fost demonstrat că elementele osteotrope, așa ca Sr și Ra, se acumulează preponderent în zonele de creștere a oaselor tubulare – metafize și epifize, repartizându-se neuniform și formând așa-numitele zone fierbinți. Astfel de distribuții neuniforme localizate sunt caracteristice și pentru alți radionuclizi ca Pu și Th – în plămâni, schelet și ficat; I – în glanda tiroidă.

Neuniformitatea distribuirii radionuclidului în țesut influențează la distribuirea mărimii și puterii dozei tisulare. Aceasta se evidențiază îndeosebi dacă microstructurile tisulare cu concentrația radionuclizilor mari mai au și o radiosensibilitate mare, dar parcursul particulelor eliminate este comparabil cu mărimile liniare ale acestor microstructuri.

Pericolul major în cazul iradierii interne este cauzat de câțiva factori:

1. Proprietatea unor radionuclizi de a se acumula în diferite organe și țesuturi – așa-numitele „critice” (de exemplu până la 30% din iod se depozitează în glanda tiroidă, a cărei masă constituie numai 0,03% din masa corpului). Astfel, iodul își eliberează energia pentru un țesut cu un volum foarte mic. În acest caz organismul joacă un rol activ în formarea dozelor tisulare din cauza particularităților proceselor transportoare și metabolice determinate de acumularea și eliminarea radionuclizilor din diferite organe și țesuturi.

2. Durata lungă de staționare a radionuclidului în organism, a cărui radioactivitate scade odată cu perioada de înjumătățire.

3. Viteza eliminării biologice se caracterizează (în cazul admiterii că eliminarea din organe decurge conform legii exponențiale) printr-o constantă λ_b , iar viteza efectivă – prin suma constantelor $\lambda_{af} = \lambda_b + \lambda_{1/2}$, unde $\lambda_{1/2}$ reprezintă constanta dezintegrării radioactive. Atunci perioada efectivă de semieliminare din organism este egală cu:

$$T_{af} = 0,693 / \lambda_{af} = T_b T_{1/2} / (T_b + T_{1/2}).$$

În cazul aprecierii dozelor mici limitate cu zona radioprotecției se folosește doza echivalentă, care se calculează cu ajutorul coeficienților modificați, luând în considerare în primul rând particularitățile izotopilor încorporați, concentrația lor specifică și condițiile timpurii de formare a dozelor tisulare în cazul încorporării cantităților mari de radionuclizi. Cel mai des, în cazuri excepționale (accidente), se dezvoltă boala actinică acută, ale cărei particularități sunt determinate de radionuclidul încorporat. De exemplu, în cazul izotopilor radioactivi ^{32}P sau ^{24}Na , radionuclidul se deosebește printr-o perioadă scurtă de înjumătățire (14,3 și respectiv 0,63 zile) și cu repartizarea uniformă, având o iradiere destul de dură. În acest caz apare boala actinică acută care se deosebește de cea apărută în urma iradierii externe. În cazul pătrunderii radionuclizilor în organism apar diferite forme ale leziunilor de iradiere cu manifestare preponderentă în țesuturile unde doza de iradiere a fost maximă, care în acest caz se transformă în țesuturi critice.

Determinarea dozei de iradiere a izotopilor încorporați este dificilă, principala problemă fiind cercetarea repartizării în spațiu și timp a dozei absorbite pe bază descrierii cantitative, a cineticii repartizării și concentrației sumare a radionuclizilor pe toate organele și țesuturile.

Soluționarea acestei probleme este posibilă numai în cazul determinării cantității de radionuclizi în organism pe căi teoretice și experimentale, cineticii comportamentului lor în funcție de particularitățile anatomice și fiziolo-

gice ale organismului în general și ale țesuturilor, organelor și sistemelor în particular, luându-se în considerare particularitățile citochinetice.

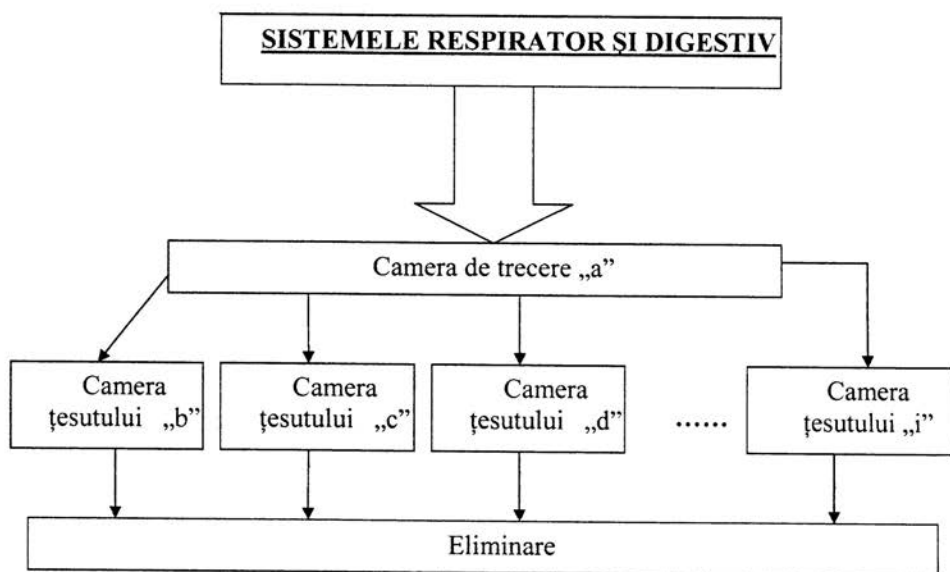


Fig 80. Modele (fantome) de procese metabolice ale radionuclizilor.

7.12. Eliminarea substanțelor radioactive din organismul uman

Substanțele radioactive, care se află într-o anumită cantitate în organismul uman, permanent sunt eliminate. Acest proces are loc prin intermediul tractului gastrointestinal, sistemului urinar, sistemului respirator și țesutului cutanat. Principala cale, însă, este considerată cea gastrointestinală, prin care se elimină cea mai mare parte din radiotoxicii pătrunși în organism (fig. 80).

Capitolul 8.

EFECTELE NESTOCASTICE (DETERMINISTICE) ALE RADIAȚIILOR IONIZANTE

8.1. Caracteristica generală a efectelor nestocastice

Acest capitol cuprinde caracteristica leziunilor la persoanele care vin în contact cu radiațiile ionizante în doze mari.

Definiție. Nestocastice (deterministice) se numesc efectele care apar la iradierea organismului cu doze mari de radiații ionizante într-o perioadă scurtă de timp (fig. 81).

În timp de pace efecte nestocastice apar în cazul accidentelor nucleare mari sau mici, iar în timpul conflictelor militare – la utilizarea armamentului nuclear (Hiroshima și Nagasaki, 1945).

Efectele apar în formă de patologii concrete cu particularități simptomatologice specifice. Ca efecte nestocastice sunt considerate: boala actinică acută și cronică; afecțiunile actinice locale; cataracta, dereglările hematopoezei; sterilitatea temporară sau definitivă etc.

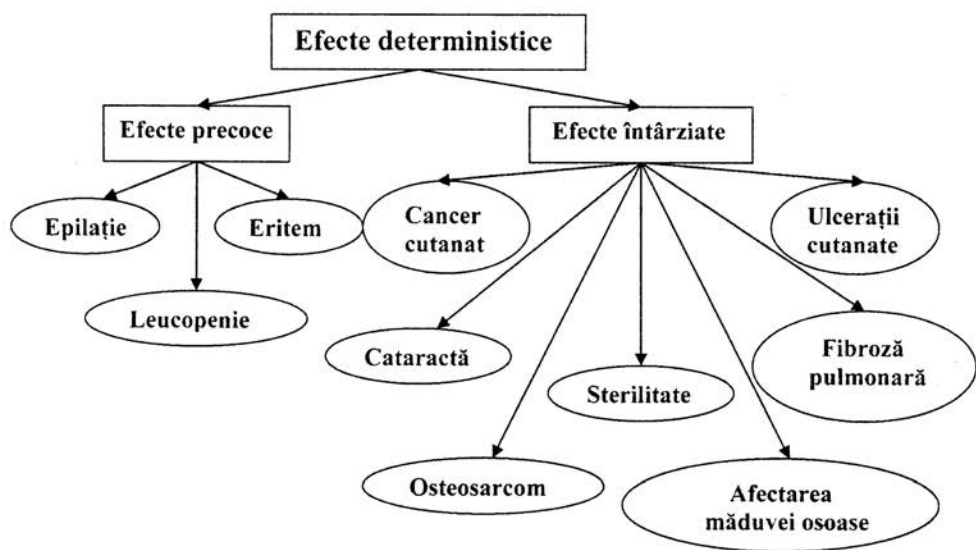


Fig. 81. Clasificarea efectelor biologice deterministice (OMS-1974).

Unul dintre parametrii principali ai efectelor nestocastice este considerat pragul de declanșare a anumitor schimbări de sănătate, iar pentru apariția unei anumite patologii este necesară o anumită doză de radiații ionizante, dacă doza este mai mică, atunci nu are loc declanșarea efectului clinic. Aceste procese pot fi utilizate pentru a efectua biodozimetria. Determinând efectul clinic care apare după iradiere, putem spune aproximativ ce doză a primit persoana iradiată (tabelul 14). Astfel, se poate presupune evoluția bolii pe baza căreia se stabilește tactica corectă de prim ajutor, apoi și de tratament. De exemplu, pentru țesutul cutanat pragul formării eritemului și a descuamării uscate constituie aproximativ 3-5 Gy, moartea celulelor în stratul epidermal și cel dermal, care duce apoi la necroză, survine după o iradiere cu aproximativ 50 Gy (tabelul 15).

Efectele iradierii asupra omului

Doza totală (Gy)	Efectele iradierii
1000	Moarte la câteva minute de la expunere
100	Moarte la câteva ore de la expunere
10	Moarte la câteva zile de la expunere
7	în 90% din cazuri mortalitate în următoarele săptămâni de la expunere
2	în 10 % din cazuri mortalitate în următoarele luni de la expunere
1	Fără mortalitate, dar o creștere semnificativă a cazurilor de cancer
1	Sterilitate temporară la femei și bărbați

Tabelul 15

Principalele efecte dăunătoare ale radiațiilor și condiții de apariție

Efect		Condiție
Imediate	Moarte	Doze și debite de doze foarte mari asupra întregului corp.
	Eritem	Doze mari la suprafața pielii.
	Sterilitate	Doze mari asupra testiculelor și ovarelor.
Întârziate	Boli maligne (cancer, leucemie)	Orice doză sau debit al dozei. Probabilitatea depinde de doză. Se manifestă peste ani.
	Modificări nemaligne (cataractă, eritem)	Doză foarte mare. Diferite perioade de manifestare.
	Tulburări de dezvoltare	Iradierea embrionului. Se manifestă după naștere.
	Efecte ereditare (malformații, cancer)	Orice doză sau debit al dozei. Probabilitatea depinde de doză. Se manifestă la descendenți.

Actualmente nu sunt suficient studiate spectrul efectelor nestocastice și dependența lor de doza de iradiere. Nu sunt diferențiate definitiv pragurile efectelor nestocastice în relație cu doza în dependență de radiosensibilitatea individuală a organismului. Sensibilitatea organismului la radiații ionizante în mare măsură este influențată de radiosensibilitatea așa-numitor organe critice (tabelul 16).

Organele critice

Grupul organelor critice	Organele critice
I	Tot corpul, gonadele, măduva osoasă roșie
II	Glanda tiroidă sau alte organe în afară de cele din grupele I și III
III	Tegumentele, oasele, mâinile, gleznelor, antebrațele

Diapazonul dozelor pragale pentru diferite organe și țesuturi este diferit (tabelul 17).

Tabelul 17

Aprecierea pragală a efectelor deterministice pentru unele organe critice

Denumirea organului, țesutului	Denumirea efectului	Pragul	
		Doza echivalentă deplină, primită la o iradiere de scurtă durată, Sv	Debitul dozei primite anual la iradierea cronică, în decurs de câțiva ani, Sv · an ⁻¹
Testiculele	Sterilitate temporară	0,15	0,4
	Sterilitate permanentă	3,5-6,0	2,0
Ovarele	Sterilitate	2,5-6,0	2,0
Cristalinul	Tumefieri primare	0,5-2,0	0,1
	Cataractă	5,0	0,15
Măduva roșie a oaselor	Inhibarea hematopoiezei	0,5	0,4

Trebuie de menționat, că pragul de declanșare a efectelor biologice în cazul iradierii acute de scurtă durată și iradierii de lungă durată este diferit. În cazul iradierii cu aceeași doză, dar pe o durată mai lungă de timp, se ridică pragul declanșării efectelor deterministice. Această legitate este determinată

prin faptul că apare posibilitatea includerii proceselor de reparație. De aici urmează, că doză declanșată într-un timp scurt este mai periculoasă decât aceeași doză declanșată într-un timp mai îndelungat.

8.2. Efecte asupra pielii și învelișului pilos

Iradierea cu doze mari a unor segmente corporale poate surveni la manipularea necorespunzătoare a unor surse de radiații și se poate traduce prin radiotermită acută, alopecie, sterilitate, leziuni oculare etc., pentru apariția acestora fiind necesare doze mai mari decât în cazul bolii de iradiere acută a întregului organism.

Cel mai frecvent leziunile profesionale cauzate de radiațiile ionizante se observă la medici, la personalul auxiliar din laboratoarele radiologice și la muncitorii de la fabricile de tuburi roentgen.

În urma influenței razelor roentgen asupra pielii pot apărea două tipuri de leziuni:

- a) inflamații acute;
- b) inflamații cronice,

Toate leziunile au o localizare de predilecție pe față, piept și pe mâini, regiuni expuse mai mult razelor, mai rar la membrele inferioare (fig. 82).



Fig. 82. Efecte ale radiațiilor ionizante asupra pielii.

Formele acute, numite și radiotermită acute, nu prezintă manifestări deosebite, ele întrunesc aspectul obișnuit al inflamației: rubor, calor, dolor.

Se deosebesc trei grade și anume:

- a) radiotermită eritematoasă;
- b) radiotermită buloasă;
- c) radiotermită necrotică.

În forma eritematoasă, leziunile se caracterizează printr-o roșeață a pielii, care apare în decurs de câteva zile după expunerea la razele X. Roșeața este

însoțită de epilație, care poate fi uneori singurul semn al radiotermitei eritematoase, atunci când eritemul este prea discret.

Când eritemul a atins punctul culminant, pielea devine lividă, se produce o descumare la suprafață, urmată de o pigmentare difuză.

În faza buloasă a radiodermitei acute pe locurile iradiate apar vezicule sau bule, de mărimi diferite, pe o bază eritematoasă. Radiotermita buloasă are o durată de aproximativ 5–6 săptămâni.

Forma necrotică a radiodermitelor se caracterizează prin leziuni tegumentare profunde extrem de dureroase, care duc la ulcerării și necroză. Aceasta se vindecă cu timpul prin cicatrice atroifice, cu telangiectazii numeroase la suprafață.

În radiotermitele de gradul II și III se produce și o alopecie definitivă, ca o urmare a distrugerii capilarelor părului.

Dacă radiodermitele acute se întâlnesc rar, cele cronice sunt mai frecvente. Ele evoluează insidios, astfel că numeroși autori le consideră o fază inflamatorie, neinsistând decât asupra aspectului lor trofic, pielea își pierde din suculența sa normală și devine subțire, lucioasă. Degetele devin subțiri și parcă ascuțite. Părul cade, iar tegumentele capătă aspectul unui țesut senil. La aceasta se pot adăuga modificările secundare, determinate de excoriații, ragade, urmate de infecții secundare.

Leziunile sunt mai frecvente pe mâini, antebrațe, obraz, gât.

Radiotermita cronică are trei forme clinice, manifestându-se ca:

1. eritem de roentgen;
2. atrofie cu telangiectazie;
3. hiperkeratoză.

Erimul de roentgen este considerat cea mai ușoară leziune a pielii, numită și „mână de roentgen” a radiologilor cu stagiul. Se caracterizează printr-o îngroșare permanentă a țesuturilor de la acest nivel, pielea având o culoare roșu-brun. Cutele pielii sunt mai accentuate, iar epiderma – îngroșată.

În forma a II-a pielea este atrofiată, depigmentată cu numeroase telangiectazii și vase de neoformație la suprafață, cu pete pigmentare de culoare roșu-brun. Totodată, pielea este uscată și fără luciu, din cauza lipsei secreției sudorale și sebacee.

În forma hiperkeratozică a radiodermitei cronice pielea reprezintă o serie de îngroșări hiperkeratozice difuze sau circumscrise.

Holzkecht consideră aceste hiperkeratoze ca formațiuni precanceroase, asemănătoare verucelor senile, din care se pot dezvolta, într-o fază mai înaintată, epitelioamele.

În faza următoare a radiodermitelor cronice întâlnim forme cu leziuni profunde, dureroase, cu exfoliații și descumări, din care se dezvoltă ulcerele radiologice, cât și cancerul radiologic, cu toate simptomele clinice bine cunoscute.

Leziuni similare pot fi produse de radium, meztoriu cât și de celelalte substanțe radioactive.

Prognostic radiodermitelor acute și cronice este dintre cele mai rezervate, fiind cunoscut faptul că aceste leziuni deseori sunt premergătoare unei neoplazii.

Mulți dintre cei afectați de leziuni precanceroase suportă ulterior amputații, unele dintre ele mutilante. Deci este necesar ca aceste accidente să fie privite cu cea mai mare atenție, iar prognosticul lor să fie rezervat.

Profilaxie. Este necesar să creăm astfel de condiții de muncă încât să nu se admită pierderi de raze X, pentru ca muncitorii care lucrează în aceste locuri să nu absoarbă o cantitate de raze prin țesutul cutanant, care ar depăși doza de toleranță (egală cu 0,1 r). Prin doza de toleranță se înțelege acea energie de raze X pe care o persoană o poate primi continuu și la intervale repetate, fără a afecta organele hematopoietice. În acest scop se vor lua măsuri ca toate instalațiile și manipulările, efectuate cu aparate de raze X și cu substanțe radioactive, să se facă conform normelor prescrise. În cazul aparatelor roentgen, trebuie să se aibă în vedere și prevenirea accidentelor ce pot fi produse de curentul electric de înaltă tensiune.

Pe lângă măsurile tehnice este important și controlul medical al muncitorilor, care activează în aceste locuri de muncă; el trebuie executat în mod regulat și la mici intervale de timp (1–2 luni). În cadrul acestui control medical se va acorda o atenție deosebită leziunilor cutanate și examenului sângelui, în cadrul căruia putem constata o anemie (hipoglobulie și hipoheмоglobinemie) cu semne de degenerescență (anizocitoză și poichilocitoză) sau de regenerație (policromatofilie, hematii nucleate), puseuri leucemice. Pentru examenul sângelui se recomandă puncția sternală.

În toate cazurile, pentru locurile de muncă unde se lucrează cu aparate roentgen sau cu substanțe radioactive, se recomandă a se cere avizul forurilor tehnice superioare privind eficiența instalațiilor făcute în vederea profilaxiei patologiei profesionale ce poate fi cauzată de aceste raze.

8.3. Boala actinică

Definiție. Boala actinică este o afecțiune care apare la persoanele expuse la radiații ionizante cu promovarea schimbărilor morfofuncționale reversibile și ireversibile în toate organele și sistemele.

Etiologia. Boala actinică acută apare în urma expunerii la doze mari de radiații ionizante, de obicei, în doze unice sau repetate, la scurte intervale de timp, efectele manifestându-se în dependență de cum a fost iradiat organismul, întregul corp sau numai anumite segmente corporale.

La iradierea întregului corp, de la doze de 25 rad (0,25 Gy), apar modificări hematologice, în general reversibile, manifestate în special prin leucopenie datorită lezării atât a serei limfoide, cât și a serei mieloide. De la 100 rad (1 Gy) apar semne evidente de boală de iradiere acută, de la 200 rad (2 Gy) apar decesele, în special prin leziuni ireversibile ale țesutului mieloid și limfoid, de la 400 rad (4 Gy) există probabilitatea de 50% a decesului, pentru ca probabilitatea să fie de 100% la valori de 500–1000 rad (5-10 Gy).

În funcție de doză, boala se poate manifesta sub forme clinice diferite. La doze deosebit de mari (peste 1000 rad) domină forma nervoasă, tradusă prin stare de agitație marcată, urmată curând de coma profundă (*tabelul 38*).

În cazul bolii de iradiere acută a întregului organism, după o primă fază în care domină fenomene nervoase – adinamie, inapetență, stare generală alterată, însoțită eventual de obnubilare – urmează o fază de remisiune, a cărei durată este în oarecare măsură invers proporțională cu doza primită, după care urmează perioada de stare a bolii, caracterizată prin sindromul hematologic, sindromul imunologic și sindromul digestiv. Sindromul hematologic este dominat de distrugerea, de obicei, ireversibilă a sistemului hematopoietic mieloid și limfoid, caracterizat prin leucopenie, anemie și trombocitopenie, apărând hemoragii și îndeosebi alterarea gravă a imunității. Apariția sindromului hematologic cu imunosupresie gravă contribuie la alterarea altor țesuturi cu rol imunologic (timus, plăci Payer). Sindromul digestiv cu greață, vome, diaree și deshidratare completează aspectul clinic al bolii. Moartea survine prin hemoragie, dar cel mai frecvent prin septicemie cu floră intestinală proprie.

La doze sub 500 rad (5 Gy) domină sindromul hematologic, în funcție de doză existând și posibilitatea vindecării.

Pe timp de pace boala acută prin iradierea întregului organism survine în mod excepțional numai în condiții de accident.

Patogeneză. Efectele sunt condiționate de acțiunea directă sau indirectă a radiațiilor ionizante asupra țesuturilor biologice.

În cazul acțiunii directe au loc schimbări intramoleculare care pot induce schimbări biochimice în țesutul iradiat. Acțiunea indirectă constă în ionizarea primară a apei cu formarea radicalilor, care la rândul lor intră în reacție cu unele structuri proteice.

În urma acestor reacții radiochimice și biochimice se dereglează funcția celulelor și țesuturilor, apar modificări complicate în mecanismele de reglare a proceselor vitale cu schimbări trofice, apar procese distrofice, dereglări în schimbul de substanțe, afecțiuni ale sistemului nervos și endocrin, organelor hematopoietice și digestive.

Se produc schimbări în metabolismul proteic, se modifică sinteza și structura proteinelor, schimbul de gaze, se formează compuși toxici secundari, se schimbă reactivitatea și rezistența organismului.

Schimbările în sistemul sangvin sunt condiționate de perversiunea hematopoezei, distrugerii hematiilor și hemoragiilor.

Scăderea activității imunobiologice și afectarea organelor hematopoietice conduce la declanșarea proceselor infecțioase cu evoluția complicațiilor grave.

Are loc dereglarea permeabilității vasculare, coagulării sângelui din cauza trombocitopeniei cu apariția hemoragiilor.

Se disting formele acută și cronică de boală actinică, care se dezvoltă în urma acțiunii externe, interne și combinate a radiațiilor ionizante.

a) Boala actinică acută cauzată de iradierea externă apare în urma iradierii organismului cu doze mari de radiații ionizante, în caz de acțiuni militare la utilizarea armei nucleare, în condiții de pace numai în cazul accidentelor nucleare mici sau mari.

În evoluția bolii actinice se disting 4 faze:

1. perioada reacției primare;
2. perioada ascunsă sau a tabloului clinic favorabil;
3. perioada de declanșare deplină a tabloului clinic;
4. perioada de însănătoșire în caz de decurgere favorabilă a tabloului clinic.

Prima perioadă se începe, de obicei, peste 30-40 minute sau după câteva ore de la iradiere și durează 1-2 zile, rareori mai mult.

În această perioadă bolnavii se simt rău, acuză astenie generală, cefalee, vertijuri, greață, vomă, diaree, iritabilitate, insomnie, periodic temperatura corporală ajunge până la 37,5°, rareori până la 38°.

La cercetarea obiectivă atrage atenția comportamentul agitat al pacienților, eritemul pielii și mucoaselor vizibile, creșterea frecvenței pulsului.

În cazurile mai complicate starea generală a bolnavilor este cu mult mai gravă, apare colaps sau chiar șoc cu prezența stupoarei. Presiunea arterială scade, frecvența pulsului crește, apar cianoză și simptome de insuficiență vasculară.

Peste 8-12 ore în sânge se observă o creștere a numărului de leucocite pe baza neutrofilelor, numărul limfocitelor, dimpotrivă, scade. De obicei, leucocitoza se menține în decurs de 4-6 zile, apoi se schimbă în leucopenie.

În măduva osoasă în această perioadă se micșorează numărul total de elemente hematopoietice pe baza dispariției aproape totală a mieloblastelor, promielocitelor și proeritroblaștilor pe fundalul măririi elementelor Botkin-Gumprecht. În sânge crește cantitatea de azot rezidual.

Perioada a doua (îmbunătățire aparentă) durează de la câteva zile până la 2-3 săptămâni, la bolnavii mai gravi ea poate să lipsească definitiv, trecând deodată în perioada de debut a bolii. De obicei, în perioada de îmbunătățire aparentă pacienții se simt bine, toate acuzele subiective lipsesc, temperatura corpului este normală, însă la cercetarea sângelui periferic se depistează leucopenie, limfopenie, reticulocitopenie.

După perioada de îmbunătățire aparentă începe următoarea, a treia perioadă – de debut. Starea generală a pacienților din nou se înrăutățește, la ei apare febră, însoțită de frisoane, din nou se remarcă simptome gastrointestinale – scăderea apetitului, grețuri, vomă. Apar hemoragii cutanate, ale mucoaselor, hemoragii nazale, ale gingiilor, apoi se dezvoltă anorexia, diaree sangvinolentă.

La cercetarea obiectivă a cavității bucale se determină o stomatită cu ulcere necrotice, deseori sangvinolente, la fel și hemoragii gingivale. Din partea sistemului cardiovascular se observă schimbări ale tonurilor cardiace, mărirea frecvenței pulsului, scăderea presiunii arteriale, în unele cazuri colaps. La examinarea sistemului respirator se determină semne de bronșită, în unele cazuri – pneumonie. La palparea abdomenului pe traiectul intestinului gros pacienții acuză durere, ficatul se palpează și este dureros. Se determină hipoaciditatea conținutului stomacal. La examinarea sângelui periferic se determină o leucopenie avansată ajungând la 1000-500 leucocite într-un cm^3 , pe baza scăderii tuturor elementelor sangvine cu dezvoltarea agranulocitozei.

Din cauza leucopeniei are loc degradarea funcției sistemului imun, ca rezultat are loc alipirea infecției secundare, apar ulcere agranulocitare și necroze, deseori apar amigdalite necrotice. Rezultatele analizei „sângelui roșu” indică scăderea numărului de eritrocite și a hemoglobinei, se dezvoltă o anemie hipocromică, mai rar hiperchromică, reticulocitele aproape că lipsesc, numărul elementelor sangvine se micșorează brusc.

La cercetarea măduvei osoase se observă o afectare mai avansată în comparație cu perioadele anterioare și anume scade numărul total de mielocario-

cite din cauza dispariției totale a mieloblaștilor, promielocitelor și proeritroblaștilor, de asemenea și a megacariocitelor, brusc scade numărul neutrofilelor segmentate și normoblaștilor (eritroblaștilor). Numărul elementelor Botkin-Gumprecht se mărește relativ, la fel și cel al celulelor plasmactice, reticulare și endoteliale. Astfel, la început se observă o hipoplazie a măduvei osoase, iar apoi aplazia ei, adică lipsa totală de elemente hematopoietice.

În ganglionii limfatici și în splină are loc distrugerea foliculilor, fapt ce denotă scăderea numărului de limfocite.

Trebuie de menționat, că în cazul bolii actinice acute au loc nu numai dereglări în privința cantității elementelor sangvine, ci și schimbări radicale privind calitatea lor.

Este demonstrat că acțiunea radiațiilor ionizante asupra celulei conduce la ruperea (fracționarea) cromozomilor, coagularea cromatinei nucleului cu dereglarea proceselor de diviziune a celulei, mărirea nucleului în volum, hipergranularea protoplasmiei, vacuolizarea protoplasmiei și a nucleului, hipersegmentația nucleelor și apariția neutrofilelor gigante.

Datele electroencefalografice indică dereglări ale funcției scoarței cerebrale.

În a treia perioadă poate surveni moartea condiționată de septicemie, diateza hemoragică și hipoplazia totală a măduvei osoase.

Dacă pacientul nu decedează în această perioadă, atunci treptat începe procesul de regenerare și însănătoșire, starea generală se ameliorează, dereglările dispeptice se micșorează, apare apetitul, se reglează somnul, presiunea arterială și temperatura corporală revin la valori normale, afecțiunile de piele treptat dispar, hemoragiile se micșorează, apoi dispar.

În măduva osoasă încep rapid să se multiplice hemohistoblaștii (celulele reticulare și endoteliale), se intensifică proliferarea celulelor stromei măduvei osoase, totodată are loc întărirea maturizării lor, astfel provocând panmielopareza, o dereglare gravă a funcției măduvei osoase. Structura sângelui periferic se restabilește mai lent, hemoragiile, la fel și astenia generală, se mențin pe o durată lungă de timp, pacienții acuză oboseală, care apare la scurt timp după începerea mișcărilor.

În evoluția bolii actinice schematic pot fi evidențiate 3 forme:

1. ușoară;
2. medie;
3. gravă.

În cazul formei ușoare toate 4 perioade sus-menționate sunt slab evidențiate, acuzele subiective se limitează la o astenie ne semnificativă, o excitabili-

tate nervoasă pronunțată, cu efecte dispeptice slabe și cefalee. Efectele hemoragice lipsesc, după o leucocitoză nu prea mare (10000-12000) se relatează o leucopenie moderată (3000-4000). Pacienții, de regulă, se însănătoșesc.

În cazul formei medii, se observă schimbări evidente din partea sistemului nervos, gastrointestinal și pielii, de asemenea schimbări în măduva osoasă și în sângele periferic. Moartea pacienților poate surveni în perioada a treia (debut al bolii), deseori din cauza infecției secundare.

Forma gravă a bolii actinice se caracterizează printr-o evidențiere vădită a tuturor indicatorilor subiectivi și obiectivi. Pacienții acuză cefalee puternică, vertijuri, grețuri, vomă, dureri abdominale, diaree, febră până la 38°-39°. Se observă complicații provocate de patologii infecțioase și hemoragii. În sânge inițial se determină leucocitoză, care apoi se schimbă într-o leucopenie progresivă, se dezvoltă agranulocitoză, trombocitopenie accentuată, anemie. Măduva osoasă e lipsită total de elemente hematopoietice. Moartea poate surveni peste 2-3 săptămâni.

b) Tabloul clinic al bolii actinice acute cauzată de iradierea internă în general este asemănător cu cel produs de iradierea externă, dar posedă și particularități specifice. Mai întâi de toate se observă predominarea efectelor locale nemijlocit legate de căile de pătrundere și de caracterul repartizării substanțelor radioactive în organele și sistemele organismului uman.

În cazul pătrunderii substanțelor radioactive în interiorul organismului se observă schimbări din partea tractului gastrointestinal (enterocolită hemoragică), ficatului și splinei (sindromul hepatolienal), rinichilor (necronefroză). La iradierea prin inhalare deseori se determină traheobronșite, pneumonii cu dezvoltarea ulterioară a pneumosclerozei. Acumularea izotopilor radioactivi în țesutul osos conduce la apariția sindromului osteoalgic persistent.

La examenul morfopatologic al decedaților de boala actinică se evidențiază semne de hemoragii. În majoritatea cazurilor hemoragiile sunt observate pe mucoase, în cavitățile seroase, în mușchi, în țesuturile subcutanate și în organele hematopoietice. Hemoragiile sunt condiționate de schimbările profunde în peretele vascular al vaselor: descuamarea și vacuolizarea endoteliului, necroza pereților vasculari. În locul hemoragiilor apar schimbări distructive și necrobiotice cu formarea ulcerelor, îndeosebi în regiunea tractului digestiv pe pereții stomacului, intestinelor și cavității bucale. Schimbări profunde se întâlnesc și în organele hematopoietice sub formă de lipsă totală de elemente hematopoietice. De asemenea astfel de schimbări se remarcă în ganglionii limfatici și în splină. Macroscopic măduva osoasă arată uscată și pală, se

întâlnesc semne hemoragice, elementele hematopoietice aproape că lipsesc, rămân numai celule reticulare, care sunt ca surse ale regenerării țesutului hematopoietic. Schimbări analogice se întâlnesc și în ganglionii limfatici. Microscopic în ei se determină descompunerea limfocitelor, prezența numai a celulelor reticulare, hiperemie acută, edem, hemoragii. Splina este deformată și micșorată în dimensiuni. Ficatul, de asemenea, este micșorat în dimensiuni, microscopic se determină semne de distrofie lipidică, deseori focare de necroze, edem pericapilar.

În rinichi se observă hemoragii, schimbări distrofice ale epiteliului canalucilor, afectarea vaselor glomerulelor.

Hemoragii evidențiate sunt observate în organele respiratorii, începând cu traheea și finalizând cu țesutul pulmonar. Pe fundal de hemoragii deseori apar pneumonii și focare de necroză cu prezența edemului, dar fără reacții leucocitare.

În cord, de asemenea, se formează numeroase hemoragii, anume în interiorul mușchiului cardiac, în epicard și submicroscopic se determină distrofia lipidică și proteică a mușchiului cardiac.

Schimbări evidențiate se remarcă și din partea sistemului nervos central și periferic. Pe lângă afectarea vaselor, care duc la hemoragii, se observă schimbări distrofice și necrobiotice clare ale celulelor nervoase, mai ales în regiunea subtalamică, cvadrigeminală, în substanța cenușie și bulbul rahidian. În faza inițială a bolii predomină fenomenele iritative (edemațiunea și vacuolizarea celulelor), apoi apar și schimbările necrobiotice. Schimbări analogice se întâlnesc și în sistemul nervos periferic, în ganglionii simpatici, în plexul solar, ganglionii intestinali, ai cordului etc.

În afară de schimbările menționate, caracteristice pentru boala actinică, deseori se formează și alte schimbări, apărute din cauza alipirii infecției secundare, care poate avea influență asupra întregului tablou clinic.

c) Boala actinică cronică în perioada de pace are o răspândire mare, în comparație cu cea acută, fiindcă apare în urma acțiunii dozelor mici de radiații ionizante în special la persoanele care lucrează cu izotopi radioactivi sau cu tuburi ce generează raze X în cazul când nu sunt respectate cerințele de protecție a muncii. O însemnătate mare are și radiosensibilitatea individuală a persoanelor care sunt antrenate în lucru cu surse de radiații ionizante. În rare cazuri boala actinică cronică poate să se dezvolte la persoanele care au fost supuse tratamentului cu radiații ionizante. În clinica decurgerii bolii actinice cronice distingem trei stadii (N.A. Kurșacov).

Primul stadiu (ușor) se caracterizează prin lipsa acuzelor sau pacientul acuză astenie, oboseală generală, nervozitate crescută și iritabilitate, cefalee și înțepături în regiunea cordului, uneori efecte dispeptice.

La examinarea obiectivă atrage atenția paliditatea pielii și mucoaselor, amplificarea reflexelor tendoanelor, tremorul pleoapelor și degetelor de la mână. Examenul sângelui indică prezența leucopeniei până la 3000-4000 pe contul neutrofilelor.

Stadiul al doilea al bolii actinice cronice prezintă dereglări mai accentuate în comparație cu primul. Cefaleea devine mai persistentă, crește frecvența vertijurilor, se remarcă astenie, nervozitate crescută, insomnie, scăderea potenței la bărbați, la femei se înregistrează dereglări ale ciclului menstrual, scăderea masei corporale, efecte dispeptice.

La cercetarea obiectivă, în afară de paliditatea pielii și a mucoaselor vizibile, se determină deshidratarea pielii, descuamarea ei, căderea părului, semne de extenuare, fragilitatea unghiilor.

Mucoasele palatului dur și moale sunt hiperemiate, edemațiate, în continuare devenind uscate, apoi este antrenat în proces și laringele. Pe baza cardiograamei se determină schimbări distrofice în miocard. La cercetarea conținutului stomacal deseori se observă scăderea acidității sau chiar achilie.

În analiza sângelui se determină o leucopenie accentuată până la 1000-2000 în 1 mm^3 pe contul scăderii neutrofilelor cu o limfocitoză relativă, în același timp se observă anemie cu o cantitate mică de reticulocite și trombocite.

Al treilea stadiu al bolii actinice cronice se caracterizează prin continuarea dezvoltării maladiei și alăturarea noilor simptome, în special diateza hemoragică, hemoragiile, de asemenea complicațiile infecțioase, care provoacă febră și agravarea stării generale a bolnavilor. Pe lângă anemie, leucopenie și trombocitopenie se dezvoltă aplazia măduvei osoase care duce la scăderea vădită a rezistenței organismului. Asocierea septicemiei și hemoragiilor poate induce decesul pacientului. Transformările în sângele periferic și în măduva osoasă decurg după tipul aleichiei hemoragice sau panmieloftizei.

d) Măsurile profilactice ale bolii actinice în timp de pace sunt destinate persoanelor antrenate în lucrul cu surse radioactive, de asemenea și celor care sunt supuși terapiei cu radiații ionizante.

În scopul profilaxiei bolii actinice la categoriile de persoane sus-menționate se efectuează instruirea privind protecția radiologică, controale medicale periodice, iar analizelor de sânge în cadrul lor trebuie să li se acorde o deose-

bită atenție în special pentru depistarea leucopeniei, dereglărilor de coagulare a sângelui (testele hemoragice).

Persoanele la care s-au determinat schimbări clinice sau hematologice sunt supuse tratamentului, li se oferă concedii sau sunt transferate la un alt loc de muncă.

e) **Tratamentul** bolnavilor cu boala actinică trebuie să fie complex, incluzând un regim alimentar adecvat.

Capitolul 9.

EFECTELE STOCASTICE (NEDETERMINISTICE) ALE RADIAȚIILOR IONIZANTE

9.1. Caracteristica generală a efectelor stocastice

Efectul nociv al radiațiilor asupra materiei vii este datorat proprietății de a ioniza mediul prin care trec, ionizarea fiind modul dominant de pierdere a energiei de către radiații când ele traversează mediul material. Materia vie este caracterizată prin existența unor molecule deosebit de mari, ale căror proprietăți și funcționalitate biochimică pot fi ireversibil perturbate. Astfel, un act de ionizare, de trecere a unui electron pe un alt nivel în acest ansamblu sau de smulgere a lui provoacă mari schimbări în caracteristicile moleculei respective, schimbări care acumulate la nivelul celulei se pot traduce prin grave dereglări ale metabolismului, culminând cu moartea celulei sau cu erori de structură și funcționare a aparatului genetic celular, de tip cancerigen sau mutagen.

Efectele stocastice sunt efecte rezultate din modificări în celulele normale, modificări produse de un eveniment de radiație ionizantă care se presupune că apare cu o probabilitate mică în celule, la doze mici. Probabilitatea unei astfel de schimbări, care apare în populația de celule dintr-un țesut, este proporțională cu doza, la doze foarte mici, situație în care, microdozimetric, se poate stabili că în medie există mai puțin de un eveniment per țintă sensibilă dintr-o celulă. Doza pentru care se menține această afirmație depinde de mărimea țintei sensibile și de TLE a radiației, ea poate fi mai mică decât multe doze utile în protecția contra radiației. De exemplu, o doză de 1mGy de raze *gama* de 1 MeV și una de 1mGy de neutroni de 1 MeV au drept consecință o medie de circa 1 (și ocazional mai mare de 2) și respectiv 10 urme per nucleu celular. Astfel, multe celule din țesutul expus la neutroni ar rămâne neiradiate. Probabilitatea ca energia să fie depozitată într-un segment specific de ADN de 2 nm

(în molecula ADN există circa 2×10^9 asemenea segmente), care este mică pentru ambele tipuri de radiații, adică de 10^{-9} sau mai mică, este mai importantă din punctul de vedere al mecanismelor carcinogene. Cu toate acestea, cantitatea de energie ce va fi depozitată la o unitate de drum de parcurs va fi mai mare pentru neutroni decât pentru raze *gamma*. Astfel, dacă modificarea unui segment distinct de 2 nm poate să joace un rol vital în procesul carcinogenic următor, modificările biologice, ce rezultă din depunerea energiei în acel segment și care se datoresc neutronilor vor fi mai mari. Acest fapt a fost confirmat în studii celulare și în experimente pe animale. Creșterea dozei în intervale de zeci de mGy duce numai la creșterea proporțională a numărului de celule ce pot fi afectate de evenimente izolate. La doze mai mari, când există probabilitatea să apară mai mult decât un eveniment per țintă sensibilă de dimensiuni aproximativ între 2 și 100 nm, probabil există o relație doză-răspuns mai complexă (de exemplu, liniar pătratică).

Sunt bine recunoscute **două tipuri generale de efecte stocastice**. Primul apare în **celule somatice** și poate conduce la inducerea cancerului la persoana expusă; al doilea tip apare în celule ale **țesutului germinal** și poate conduce la tulburări ereditare la descendenții celor iradiati.

Efectele stocastice:

- Se datorează modificărilor celulare (ADN) și proliferării spre boli maligne.
- Severitatea este independentă de doză.
- Nu există doză-prag: efectele pot să apară și la doze foarte mici.
- Probabilitatea de apariție a efectului crește cu doza.

La doze mici afectarea celulelor este un efect întâmplător, chiar dacă există depozitare de energie sau nu. Este necesar de reținut:

- 1 cm^3 de țesut = 10^9 celule;
- 1 mGy \rightarrow o celulă din 1000 sau 10^6 sunt țintite;
- 999 din 1000 leziuni se repară, lăsând 10^3 celule afectate;
- 999 din cele 1000 de celule afectate mor (nu e o problemă majoră pentru că fiecare persoană pierde zilnic milioane de celule);
- celula afectată poate supraviețui cu modificări (poate supraviețui cu mutații).

9.2. Efecte somatice

Efecte somatice apar la nivelul celulelor somatice, ce acționează asupra fiziologiei individului expus, provocând distrugerii care duc fie la moartea rapidă, fie la reducerea semnificativă a speranței medii de viață. Leziunile somatice apar în timpul vieții individului iradiat și pot fi imediate sau tar-

dive. Efectele somatice pot fi, la randul lor: imediate, cronice și întârziate. Efectele somatice imediate sau pe termen scurt se manifestă la câteva zile, săptămâni sau luni de la iradiere. Aceste efecte sunt, de regulă, nestocastice (nealeatorii), adică se produc la toți indivizii expuși la o doză superioară dozei de prag. Efectele somatice tardive sunt cele care apar după o perioadă mai lungă de timp, de ordinul anilor, numită perioadă de latență, și se manifestă în special sub formă de leucemie sau cancer. Aceste efecte sunt de natură stocastică (întâmplătoare) în sensul că este imposibil de evidențiat o relație cauzală directă – probabilitatea producerii unui efect este proporțională cu doza de iradiere.

Efectele somatice dau așa-numita boală de iradiere, care se manifestă prin următoarele sindroame imediate:

- sindromul sistemului nervos central, care se instalează după câteva minute sau ore de la o iradiere de 50-60 Sv. Se manifestă prin convulsii și lipsă de coordonare;
- sindromul gastrointestinal, manifestat prin greață, vomitări, diaree.

Printre efectele somatice cronice se înscriu: depresiuni hematopoietice, sterilitate, tulburarea vederii (cataracte), alopecia (căderea părului). Ca efecte întârziate se relevă: scurtarea vieții și apariția neoplasmelor în diferite forme (frecvent cancer epitelial și pulmonar).

Gravitatea bolii de iradiere depinde de echivalentul dozei. Astfel:

- pentru echivalentul dozei sub 2 Sv nu se evidențiază influențe;
- pentru echivalente ale dozei între 2-5 Sv examenul hematologic pune în evidență reducerea globulelor albe și trombocitelor;
- între 5 și 9 Sv mortalitatea este ridicată;
- peste 9 Sv mortalitatea este de 100%, dacă nu se face transplant de măduvă osoasă.

Inducerea cancerului

Inducerea cancerului este cel mai important efect stocastic din punctul de vedere al protecției radiologice. Este un proces multistadial-tipic în trei etape: fiecare etapă necesită un eveniment. Este un proces complicat care implică celulele, comunicarea între celule și sistemul imun. **Doza efectivă** este folosită pentru a descrie relevanța biologică în cazul unei expuneri la radiații atunci când diferite țesuturi și organe primesc doze absorbite din diverse surse. Conceptele de doză efectivă și factorii de ponderare pentru țesuturi sunt aplicabile doar pentru efectele stocastice.

Doza efectivă este o cuantificare a riscului. Pentru cuantificarea efectelor stocastice se calculează riscul de deces prin cancer pe durata întregii vieți la populația generală, care constituie circa 5%. Riscul de cancer fatal pe durata întregii vieți constituie: la măduva osoasă – 0,5%, la suprafața osului – 0,05%, la sân – 0,2 %, plămân – 0,85 %, la tiroidă – 0,08 %.

Efectele biologice, care apar în urma iradierii, sunt dependente de: doza de radiații și debitul dozei. Efectele biologice ale radiațiilor pot fi grupate astfel: efecte somatice, efecte teratogene, efecte genetice.

Se admite că nu există un prag pentru indicarea unei schimbări moleculare la locuri specifice din ADN, implicate în evenimentele inițiale care duc la transformarea malignă, și, în cele din urmă, la cancer. La câțva timp după evenimentul inițial este posibil să apară o clonă de celule cu potențial malign, iar după evenimente ulterioare în celule sau în mediul lor ambiant se poate dezvolta un cancer (Okeanov, Vakimovici, 1999).

Probabilitatea de dezvoltare a unui cancer, ce poate fi pus în evidență, este mult mai mică decât cea a evenimentelor inițiale din cauza mecanismelor de apărare ale gazdei și a insuccesului schimbărilor succesive cerute pentru exprimarea potențialului malign al celulelor inițiale.

Intervalul de timp dintre expunerea la radiații și recunoașterea unui cancer (perioada de latență) la om este de câțiva ani.

Perioada de latență medie poate dura opt ani în cazul unei leucemii induse și cu doi sau trei ani mai lungă în cazul unor numeroase tumori solide induse, așa ca, de exemplu, la sân sau la plămân. În cazul altor cancere decât leucemia și osteosarcomul, riscul relativ pentru persoanele iradiate în perioada adolescenței rămâne aproximativ constant în timp. Cu toate acestea, există unele dovezi cu privire la un risc relativ în descreștere pentru persoane expuse în copilărie și s-a sugerat o scădere a frecvenței în timp în cazul expunerii la radon și în cazul cancerului pulmonar (NCRP, 1984; NAS, 1988; Dubrova et al., 1999).

Aceasta se constată, de asemenea, la unele cancere ce apar la pacienți supuși terapiei cu raze X pentru spondilite ankilopoietice (Darby ș.a., 1987) și în cancerul tiroidian indus de radiație (Shore ș.a., 1985).

Se presupune că riscul inducerii de cancer este proporțional cu numărul de celule iradiate dintr-un organ sau țesut dat, chiar dacă datele indică faptul că, între specii, nu există o corelație cu mărimea organismului. Atunci când un organ sau un țesut este iradiat neuniform apar situații speciale, cazul extrem fiind reprezentat de situația în care particule foarte „fierbinți”(foarte active)

iradiază numai o porțiune din organ sau din țesut, precum în cazul plămânului sau al ficatului. În această situație doza mediată pe întregul țesut este mult mai mică decât în vecinătatea concentrației mari de material radioactiv. S-au efectuat studii experimentale în această privință (Little ș.a., 1970; Little, TOLL, 1974), iar subiectul despre afectarea plămânilor către particulele *alfa* este recenizat de către Consiliul Național de Măsurători și de protecție la Radiație, și de către Academia de Științe a Statelor Unite. În general, s-a constatat că materialul radioactiv în concentrații mari în „Puncte fierbinți” este mai puțin eficace din punct de vedere carcinogen decât aceeași cantitate de material împrăștiat uniform și care livrează o doză mai mică, dar uniformă.

9.3. Efecte genetice

Efecte genetice apar în celulele germinale sexuale din testicule sau ova-re – aceste mutații letale sau subletale la descendenți se datorează unor efecte imediate ale radiațiilor cum ar fi: alterarea cromozomilor (translocații, apariția de extrafragmente), ruperea unor segmente de cromatină, alterarea chimică a codului genetic, fie prin acțiunea radicalilor liberi asupra bazelor azotate ale acizilor nucleici, fie prin ruperea lanțului aceluiași acizi. Gravitatea efectelor mutagene apare prin transmiterea la descendenți a unor translocații cromozomiale, efect biologic care apare și la doze mai mici.

Dozele de radiații care pot produce apariția unui minim de mutații într-o generație de indivizi, într-un ecosistem, dacă sunt menținute în permanență, pot conduce la adevărate catastrofe ecologice în generațiile următoare.

Numeroase cercetări efectuate au evidențiat că, prin iradiere, se pot produce și mutații genetice, de la cele mai severe, ca de exemplu, retardul mental, până la cele mai banale, cum sunt petele pielii.

La plante, prin iradiere, s-au obținut mutații genetice benefice, materializate prin creșterea calității și productivității. Se pare, însă, ca acest lucru are loc numai până la anumite doze relativ mici. Depășirea acestora poate produce leziuni biochimice ireversibile.

În ceea ce privește norma referitoare la nivelul admisibil al radioactivității, alta decât cea naturală, a fost calculată pentru un individ din populație, în medie, la un echivalent al dozei efectiv de 1 mSv/an, adică jumătate din valoarea datorată iradierii naturale.

Raportat la activitatea surselor pentru praful atmosferic și depuneri, există următoarele limite:

- de atenționare, când activitatea are valori de $185 \text{ Bq/m}^2 \text{ zi}$;
- de avertizare, când activitatea atinge valori de $370 \text{ Bq/m}^2 \text{ zi}$;
- de alarmare, când activitatea atinge valoarea de $1\ 851 \text{ Bq/m}^2 \text{ zi}$.

9.4. Efecte stocastice la descendenți

Vătămarea cauzată de radiație în celulele germinale (mutații și aberații cromozomiale) poate fi transmisă și exprimată ca tulburări ereditare la descendenți. Radiația nu a fost identificată ca o cauză a unor asemenea efecte la om, dar studii efectuate pe plante și animale sugerează că vor apărea astfel de efecte, ale căror consecințe vor varia de la malformații banale nedetectabile, trecând prin malformații serioase sau prin pierderi de funcțiuni, până la moarte prematură. Este de presupus că orice leziune neletală în celule germinale umane poate fi transmisă generațiilor următoare.

Acest tip de efect stocastic este numit ereditar. Efectele ereditare variază pe scară largă în ceea ce privește severitatea lor. Un asemenea efect este producerea de mutații dominante ce conduc la boală genetică la prima generație de descendenți. Unele afecțiuni de acest fel produc o vătămare severă a individului afectat, amenințând uneori viața acestuia. Ele apar predominant la prima și la cea de-a doua generație după expunere.

Aberațiile cromozomiale pot produce, de asemenea, anomalii congenitale la copii (CIPR, 1996).

Mutațiile recesive produc un efect redus la primele câteva generații de descendenți, dar contribuie la o vătămare genetică a generațiilor următoare. De asemenea, există multe afecțiuni dăunătoare cu o incidență dăunătoare substanțială la om, care se datorează interacțiunilor dintre factorii genetici și cei de mediu. Ele sunt cunoscute ca tulburări multifactoriale. Deși nu a fost încă demonstrată nici la om, nici la animale o creștere generală în mutații, este posibil să crească incidența lor. Pentru aprecierea consecințelor la indivizii expuși, CIPR (1996) a luat anticipat în considerare efectele ereditare care vor apărea, probabil, la copiii și la nepoții lor. Astfel, efectele la generațiile mai târzii continuă să fie considerate ca o parte a consecințelor pentru societate.

CIPR (1960) consideră că valorile coeficienților nominali de probabilitate a efectelor ereditare de $1 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ pentru întreaga populație și de $0,6 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ pentru populația activă reprezintă respectiv numărul ponderat al efectelor ereditare anticipat pentru toate generațiile (*tabelul 18*).

Coeficienții nominali de probabilitate pentru efecte stocastice

Populație expusă	Detriment (10^{-2} Sv^{-1}) ¹			
	Cancer fatal ²	Cancer nefatal	Efecte ereditare severe	Total
Populație activă adultă	4,0	0,8	0,8	5,6
Populație în totalitate	5,0	1,0	1,3	7,3

Notă: 1 – valori rotunjite; 2 – în cancerul fatal coeficientul detrimentului este egal cu coeficientul de probabilitate.

9.5. Efectele expunerii prenatale

Efectele expunerii la radiații asupra embrionului depind de timpul de expunere. Atunci când numărul de celule din embrion este mic și când natura acestora nu este încă specializată, efectul vătămării celulelor date poate să ia forma unui insucces de implantare sau a unei morți nedetectabile a embrionului. Se consideră că orice vătămare celulară în această fază provoacă mai degrabă moartea embrionului decât conduce la efecte stocastice exprimate la cei născuți vii.

Este puțin probabil ca expunerea embrionului în primele trei săptămâni de la concepție să ducă la efecte deterministice sau stocastice la copilul născut viu, deși sistemul nervos central și inima încep să se dezvolte din săptămâna a treia. În perioada de organogeneză majoră care a mai rămas, perioadă considerată în mod convențional ca începând din a treia săptămână de după concepție, pot fi cauzate malformații în organul aflat în dezvoltare la momentul expunerii. Aceste efecte posedă un caracter deterministic și au pentru om un prag de circa 0,1 Gy, prag evaluat din experimente pe animale.

Este probabil ca expunerea la radiații, în perioada de la 3 săptămâni după concepție și până la sfârșitul sarcinii, să provoace efecte stocastice care să rezulte într-o creștere a probabilității cancerului la născutul viu. Datele disponibile nu sunt consistente, iar incertitudinea care există este considerabilă.

La unii copii aflați în stadiu intrauterin, purtați de mame din Hiroshima și Nagasaki (Fujita, Kobo, Schull, 1989), pentru coeficientul de inteligență s-au evaluat valori mai mici decât cele așteptate. În plus, s-a raportat o creștere, legată de doză, a frecvenței copiilor încadrați în categoria „copii grav retardați mental”. Numărul de cazuri este mic, însă datele indică o probabilitate suplimentară a unor retardări mentale severe la iradierii de la 0,4 la 1 Sv.

Capitolul 10.
**TIPURI DE RELAȚIE DOZĂ-EFECT
ALE RADIAȚIILOR IONIZANTE**

Termenul consacrat, care descrie cantitatea și distribuția energiei de ionizare și excitare eliberată de-a lungul traiectoriei unui foton sau a unei particule încărcate, este *transferul liniar de energie* (TLE).

Tipurile de radiații slab ionizante, care distribuie cantități relativ mici de energie de-a lungul traiectoriei lor, dar au suficientă energie cinetică să traverseze distanțe considerabile în țesuturi, sunt clasificate drept *radiații cu TLE scăzut*. În acest sens, radiațiile X și γ sunt radiații cu TLE scăzut, de aproximativ 3-3,5 keV/ μm sau mai puțin.

Radiațiile, care distribuie cantități mari de energie și care traversează distanțe mici în celule și țesuturi, sunt denumite drept *radiații cu TLE ridicat*. Dintre acestea fac parte neutronii de fisiune de diverse energii și particulele *alfa* emise prin dezintegrarea numeroșilor radioizotopi. Valoarea TLE pentru radiații cu TLE ridicat variază între zeci și sute de keV/ μm .

TLE este un parametru important pentru determinarea profilului curbei doză-răspuns în producerea de aberații cromozomiale, pentru determinarea eficienței relative a diferitor tipuri de radiații în inducerea aberațiilor cromozomiale și pentru determinarea distribuției acestora în celulele afectate.

Următoarele referiri la tipurile de relație doză-efect vor avea în vedere ca efect aberațiile cromozomiale.

10.1. Relația doză-efect pentru radiații cu TLE scăzut

Numeroase laboratoare au determinat relația doză-efect a inducerii aberațiilor în limfocitele umane iradiate *in vitro* (Lloyd și Edwards, 1983). Curbele de calibrare, obținute pe aceste experimente *in vitro*, descriu numărul relativ de aberații cromozomiale induse pe unitatea de doză de radiații (centiGy) și servesc ca referință standard pentru estimarea dozei primite de persoane, prin expunere la radiații ionizante de energii similare.

În urma expunerii acute *in vitro* la radiații cu TLE scăzut, respectiv radiații X și *gamma*, frecvența aberațiilor care rezultă din rupura singulară a unui segment de cromozom (ex.: delețiile terminale) crește ca o funcție liniară a dozei de radiații. În contrast, frecvența aberațiilor de tip schimb asimetric – dicentricii, care rezultă din ruperea și reunirea a două segmente separate de cromozomi, crește proporțional cu o funcție de tip liniar-pătratic, exprimată matematic prin relația:

$$Y = c + \alpha D + \beta D^2 \text{ (Lea 1946), unde}$$

Y – producția de aberații cromozomiale (dicentrici),

D – doza de radiații,

c – frecvența de fond a aberațiilor cromozomiale,

α și β – coeficienți derivați din construirea curbei.

Deși procesele biofizice și moleculare, implicate în producerea aberațiilor cromozomiale de către radiațiile ionizante, sunt complexe și incomplet elucidate, tipul de ecuație doză-efect a radiațiilor cu TLE scăzut se poate interpreta și în termeni mai simpli. Ecuația liniar-pătratică arată că producția totală de dicentrici, în urma expunerii la radiații cu TLE scăzut, este suma producției de aberații induse de două funcții separate de doză-răspuns. O parte a dicentricilor, exprimată de αD a ecuației, variază ca o funcție liniară a dozei de radiații. A doua parte a dicentricilor exprimată de βD^2 a ecuației, arată o creștere cu pătratul dozei de radiații.

Dacă formarea dicentricilor este interpretată în contextul modelului liniar-pătratic doză-efect, αD sau expresia liniară poate fi considerată ca numărul de dicentrici produși de o singură traiectorie a radiațiilor cu TLE scăzut, în timp ce βD^2 sau expresia pătratică a dozei poate fi considerată ca numărul de dicentrici (sau alte tipuri care presupun două rupturi de cromozomi în formarea unei aberații) induși de două sau mai multe traiectorii independente ale radiațiilor.

Logic, se deduce că doze mici de radiații tip X sau *gamma* induc un număr redus de dicentrici care rezultă din evenimente tip „o singură traiectorie”. La doze mari de radiații crește probabilitatea interacțiunii leziunilor ADN-ului, produse de două sau mai multe traiectorii independente; în acest caz, producția dicentricilor variază în special ca o funcție pătratică a dozei.

10.2. Relația doză-efect a radiațiilor cu TLE ridicat

După expunerea la radiații cu TLE ridicat, producția totală de aberații cromozomiale variază ca o funcție liniară a dozei.

Producția de dicentrici este descrisă adecvat de ecuația:

$$Y = c + \alpha D, \text{ în care}$$

Y – numărul de dicentrici,

c – frecvența de fond a aberațiilor,

D – doza de radiații.

Acest tip de relație, în cazul neutronilor de fisiune, arată că se presupun multiple leziuni ale ADN-ului după traversarea unei singure traiectorii, întrucât

radiațiile cu TLE ridicat distribuie suficientă energie de-a lungul traiectoriilor lor ca să producă multiple rupturi cromozomiale, răspunsul de tip pătratic contribuie insuficient la producerea aberațiilor, după expunerea la majoritatea tipurilor de radiații cu TLE ridicat.

10.3. Eficacitatea biologică relativă (EBR) pentru radiațiile cu TLE ridicat și scăzut

Comparând numărul relativ de dicentrici induși în limfocitele, expuse la doze egale de radiații cu TLE scăzut (radiații gama) și TLE ridicat (neutroni), se constată că radiațiile cu TLE ridicat sunt mult mai eficiente în producerea de dicentrici pe unitatea de doză decât radiațiile cu TLE scăzut.

Diferențele privind eficacitatea celor două tipuri de radiații reprezintă o măsură a „*eficacității lor biologice relative*” (EBR). Din punct de vedere radiobiologic, EBR reprezintă raportul dintre doza unei radiații standard (250 keV radiații X sau γ) necesară pentru a produce o magnitudine dată a unui efect sigur și doza unui alt tip de radiații necesară pentru a produce aceeași magnitudine a efectului dat (Casarett, 1968).

EBR pentru diferite radiații depinde de rata medie a pierderii de energie de-a lungul traiectoriilor particulelor ionizante individuale sau a fotonilor și de nivelul efectului. În general, valorile EBR cresc cu creșterea TLE până la 70-100 keV/ μm și apoi descresc pe măsură ce TLE devine mai mare. Energia în exces pentru a produce aberații cromozomiale se pierde după ce a fost depozitată în țintele critice.

10.4. Relația doză-efect în expunerea internă

Folosirea aberațiilor cromozomiale pentru evaluarea expunerii la radiații în expunerea internă ridică numeroase probleme. În primul rând depunerea, distribuția și doza în celule individuale depind de radionuclidul implicat, de calea de expunere, de statutul metabolic al individului și de starea chimică și fizică a radionuclidului.

În al doilea rând, datorită diferențelor individuale, este imposibilă estimarea precisă a dozei de radiații primită de fiecare individ în parte, chiar dacă se cunoaște nivelul expunerii, radionuclidul implicat și forma lui fizică și chimică.

În al treilea rând, chiar dacă individul este bine studiat după expunere, este dificilă (fiind vorba de om) obținerea probelor de țesuturi care au primit cele mai ridicate doze și, deci, este dificilă estimarea riscului radioindus. Răspunsul

biologic, respectiv inducerea aberațiilor cromozomiale, este măsurat în general în limfocitele sangvine, neținându-se cont că doza biologică de radiații poate varia, fiind neuniform distribuită și concentrată în alte ținte ale organismului.

Pentru estimarea dozei de radiații primite prin depozitarea internă a radionuclizilor, se impune definirea căilor de pătrundere, depozitare, distribuție și retenție în organism. Numeroase studii au definit acești parametri pentru o serie de radionuclizi și implicit i-au folosit pentru calcularea dozelor de radiații în organele critice adecvate, imaginând modele matematice.

Rata dozei în iradierea internă este adesea scăzută și variabilă, în funcție de timpul după depunerea internă a materialului radioactiv. Mulți radionuclizi, în special α -emițători și radionuclizii conținuți în particule, se distribuie neuniform în organe. Uneori o mică fracțiune din totalul celulelor unui organ poate primi o doză mare de radiații, în timp ce majoritatea celulelor primesc o doză mică sau deloc.

10.5. Influența TLE asupra relației doză-efect în expunerea internă

Numeroase studii au folosit aberațiile induse în hepatocite ca model pentru determinarea influenței TLE-ului în inducerea aberațiilor cromozomiale, după expunerea internă la materialul radioactiv depozitat.

Radionuclizii selectați pentru aceste studii sunt depozitați și reținuți în ficat pentru perioade mai îndelungate de timp. Astfel, distribuția izotopului în populația de celule poate fi suficient de bine definită, iar doza totală de radiații și rata dozei în hepatocite poate fi calculată. Timpul de viață al celulelor este relativ egal cu timpul de expunere la radiații.

Hepatocitele pot fi stimulate să se dividă prin hepatectomie parțială, iar efectul cumulativ asupra cromozomilor se poate măsura.

Expunerea se poate datora fie emițătorilor interni, fie expunerii externe la doze mici sau mari de radiații. Din studiile efectuate, deducem că există o creștere liniară a frecvenței aberațiilor cromozomiale cu doza de radiații în hepatocite, în cazul expunerii la radiații γ și β și la radiații α , unde rata dozei are o influență mică asupra răspunsului.

Hepatocitele au fost folosite și pentru a determina influența distribuției neuniform localizate a radionuclizilor asupra producției de aberații cromozomiale. Frecvența aberațiilor a fost măsurată după injectarea unei soluții monodisperse de citrat de plutoniu, care se distribuie aproximativ uniform în ficat și a fost comparată cu frecvența distribuției aberațiilor după injecta-

rea de particule de oxid de plutoniu de diferite mărimi și activități specifice (Brooks și colab., 1976) sau după injectarea de Thorotrast (Brooks și colab., 1986).

S-a constatat că frecvența aberațiilor a fost similară în cazul expunerii la citrat de ^{239}Pu și la particule de oxid de ^{239}Pu , cu un diametru mai mare de 0,84 μm . Frecvența aberațiilor a scăzut cu creșterea mărimii particulelor de oxid de ^{239}Pu , datorită dozei locale foarte mari în celulele din jurul particulelor, având drept rezultat moartea celulelor și dispersia radiațiilor. Frecvența aberațiilor în cazul distribuției neuniforme a Thorotrastului a fost similară cu cea produsă de citratul de ^{239}Pu .

Datele existente despre expunerea profesională la material radioactiv prin depunere internă arată o creștere a frecvenței aberațiilor cromozomiale în limfocitele sângelui periferic. Datorită acestui răspuns slab și variabilității individuale, posibilitatea practică a folosirii aberațiilor limfocitelor pentru detectarea depozitării materialului radioactiv este mică.

În cazul expunerii accidentale la doze foarte mari sau în cazul expunerii medicale la doze mari s-a observat o creștere a frecvenței aberațiilor.

Relația dintre doza de radiații și frecvența aberațiilor este dependentă de TLE al emisiei radionuclidului. Frecvența aberațiilor poate fi influențată de calea de retenție a radionuclidului, de distribuția celulară și în organ a radionuclidului, ca și de timpul de supraviețuire a limfocitelor lezate.

10.6. Influența TLE (transfer liniar de energie) al radiațiilor asupra complexității leziunilor ADN-ului

Pentru producerea unei rupturi duble a lanțurilor de ADN sunt necesare 2-6 ionizări într-o secțiune a ADN-ului de 1-4 nm (Brenner și Ward, 1992; Michalik, 1993). Aceste rupturi apar în mai puțin de 1 ms după ce radiațiile ionizante traversează nucleul celular, ele reparându-se sau reparându-se eronat în următoarele minute, ore.

Michalik (1992) a studiat frecvența leziunilor singulare și multiple într-un singur lanț ADN și a leziunilor multiple în ambele lanțuri (rupturi, lezarea bazelor, a glucidelor). El a arătat că odată cu creșterea TLE-ului, crește dramatic raportul leziuni multiple/leziuni singulare. Rezultate similare au fost obținute de Holley și Chatterjee (1990), care au sugerat că pentru radiațiile cu TLE ridicat probabilitatea producerii de fragmente mici de ADN (1-4 baze perechi) este mare. Radiațiile cu TLE scăzut induc o gamă complexă de leziuni, în prin-

cipal leziuni simple și singulare. Cu creșterea TLE-ului, crește producerea de leziuni complexe.

În general, după inducerea unei rupturi duble a lațurilor de ADN, o serie de procese enzimatică vor restitui sau vor repara eronat leziunea. Dacă nu se restituie, perechi de rupturi duble pot da naștere la schimburi prin reparare eronată (Savage, 1990). Unele schimburi dau naștere la dicentrici, care sunt legați de letalitatea celulară, în timp ce altele dau naștere la translocații sau inversii, ce pot fi legate de inducerea cancerului.

Odată cu creșterea TLE-ului radiațiilor ionizante, crește și producția de aberații cromozomiale tip schimb. Astfel, fie că numărul inițial al rupturilor duble crește rapid, fie că balanța dintre reparare și repararea eronată se schimbă (sau amândouă). Schimbarea echilibrului se poate întâmpla în două moduri: prin *efectul de proximitate* și prin *efectul de severitate*.

În primul caz, rupturile duble se formează mai aproape unele de altele pentru radiațiile cu TLE ridicat, astfel crescând și probabilitatea interacționării și reparării eronate a lor. În al doilea caz, cu cât TLE crește, apare un număr crescând de rupturi duble severe de viață, lungi sau mai scurte de schimb, în ambele situații rezultatul fiind creșterea producției aberațiilor cromozomiale tip schimb.

10.7. Relațiile doză-efect: curbele supraviețuirii celulare

Tipurile relațiilor doză-efect necesare supraviețuirii celulare sunt reprezentate în *figura 83*.

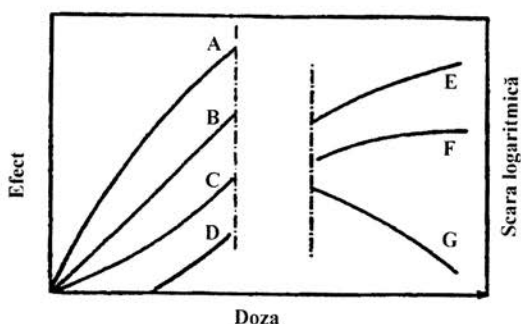


Fig. 83. Tipuri de relații doză-efect.

În general se disting două tipuri de relații doză-efect necesare supraviețuirii celulare:

- Supraviețuirea exponențială
- Supraviețuirea cu susținere

Supraviețuirea exponențială. Punctele experimentale sunt descrise de o funcție exponențială cu ecuația de tipul $S_{(D)} = e^{-\alpha D}$, reprezentată grafic în sistem de coordonate semilogaritmice (fig. 84, curba A, unde „ α ”- dimensiunea inversă a dozei, care reprezintă panta dreptei $\ln(S) = -\alpha D$).

Supraviețuirea cu susținere. Curbele B și C din figura 82 nu sunt liniare de o transformare semilogaritmice. Aceste curbe au concavitățile îndreptată în jos și reprezintă produsul a două exponențiale: $S(D) = e^{-\alpha D} + e^{-\beta D^2}$, unde α și β reprezintă coeficienții liniari și pătratul relației logaritmice efect = $f(\text{doză})$. Este vorba de supraviețuirea celulară a populației mixte.

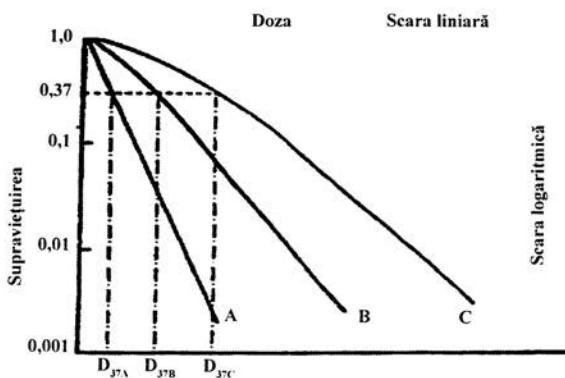


Fig. 84. Curbele supraviețuirii celulare: aspect general.

Se observă prezența a „n” tipuri de celule sau celule care se află în diferite faze nesincronizate pe parcursul ciclului. În acest caz schema se complică. Ca exemplu putem lua cazul simplu al celor două populații A (α) și B (β) și suma $A + B$. Curba supraviețuirii va fi reprezentată ca suma celor două funcții exponențiale $S(D) = e^{-\alpha D} + e^{-\beta D^2}$ și reprezentată grafic în sistem de coordonate semilogaritmice (figura 85, A și B). Panta inițială a dozelor slabe ne arată radiosensibilitatea populației radiosensibile. La expunerea cu doze puternice nu se va evidenția populația cea mai radiorezistentă prezentă inițial.

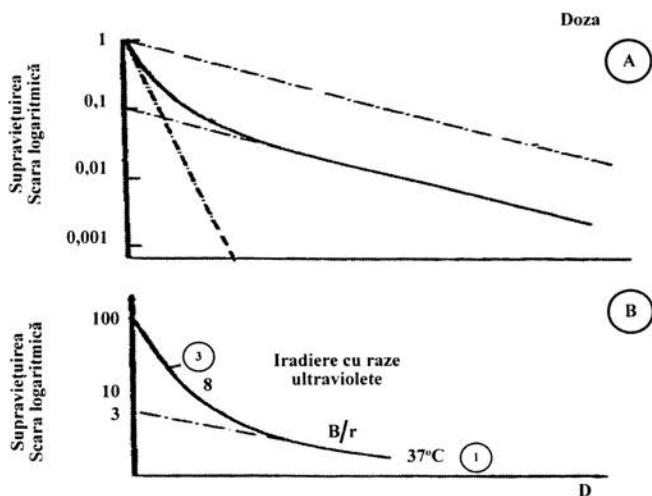


Fig. 85. Supraviețuirea populațiilor eterogene.

10.8. Metode de determinare a normelor de supraviețuire celulară

Primele curbe ale supraviețuirii celulare a celulelor eucariote au fost reprezentate de savanții Puck și Marcus în 1956. Ele și constituie originea radiobiologiei celulare cantitative. Pe parcurs cercetările în această direcție s-au dezvoltat considerabil, astfel încât experimenterii la etapa actuală dispun de o serie de posibilități adecvate.

Expunerea la radiații ionizante și clonarea *in vitro*. Se analizează tumorile animale și umane, și unele celule sănătoase cum ar fi fibroblastele. Celulele sunt incubate de celulele tehnice vecine, utilizate în bacteriologie până și după expunerea la radiații ionizante. Mediile de cultură sunt specifice.

Expunerea la radiații ionizante *in vivo* și clonarea *in vitro*. Se expune la radiații ionizante tumoarea *in vivo*, adică a unui animal viu, după care se testează viabilitatea celulelor și se pregătește o suspensie din aceste celule, inclusiv și tumoarea.

Expunerea la radiații ionizante *in vivo* și viabilitatea *in vivo*. Se expune tumoarea animalului viu. Se pregătește o suspensie de celule izolate, care se injectează în animalul „recipient”, și se calculează coloniile la nivel de organ ca: plămâni sau splina în cazul celulelor de origine hematopoietică. În caz particular, la sfârșitul zilei a treia, seucid animalele expuse radiației și se numără câte cripte intestinale au regenerat.

10.9. Clasificarea leziunilor celulare

În funcție de gravitatea lor la nivel celular și de modul de transformare a lor, leziunile celulare se clasifică în trei categorii:

- leziuni letale;
- leziuni subletale;
- leziuni potențial letale.

Leziuni letale. Leziunile letale reprezintă leziuni ce poartă un caracter inevitabil al morții celulei. Panta originii curbei de supraviețuire reflectă existența leziunilor în cazul când D tinde spre 0. Panta originii diferită de 0 este o dovadă obiectivă a prezenței lor.

Leziuni subletale. În anul 1959, savanții Elkind și Sutton au demonstrat că celulele repară o parte din leziuni între două fracțiuni de doză. Lucrările lor au fost confirmate atât *in vitro*, cât și *in vivo*. În condiții normale ale vieții celulare, leziunile sunt reparate în câteva minute, nivelul de reparare reprezintă „calitatea celulei”. Astfel e cunoscut numărul de celule care repară foarte bine și numărul de mutanți care repară slab, pentru diferite tipuri de celule CHO (EM9, xrs-5, xrs-6). În cazul când leziunile nu sunt reparate sau o leziune suplimentară este creată la nivelul lor, nu le putem considera letale. Convalescența leziunilor subletale le transformă în leziuni letale.

Un rol esențial în potențialitatea de acumulare și convalescență îl joacă doza și consumul de doză. Se observă o competiție între procesul de creare a leziunilor și cel de reparare a lor. Importanța fenomenelor de reparație a celulelor poate fi redată cu ajutorul termenului de „doză adițională”, necesară pentru a obține nivelul de supraviețuire sau efectul biologic stabilit.

Doza adițională este egală cu $2D_1 - D$ și depinde de capacitatea de reparație a celulelor studiate.

Leziuni potențial letale (PLD). Leziunile potențial letale sunt leziuni a căror transformare poate fi influențată de mediul ambiant și care atacă celula la finele expunerii cu radiații ionizante. Primele studii asupra leziunilor (PLD) au fost efectuate *in vitro*. După expunerea la radiații ionizante s-a observat o diminuare a nivelului de supraviețuire celulară, dacă celulele sunt incubate timp de câteva ore într-o soluție hipertonică (NaCl, 0,5 M), care împiedică diviziunea și inhibă fenomenele de reparație a leziunilor potențial letale, și sunt clonate în mediu nutritiv complet.

Expunerea la radiații ionizante a celulelor în faza staționară (faza în care densitatea celulară nu permite diviziunea lor) duce la reparația unor leziuni

PLD, în cazul când celulele sunt în condiții experimentale după expunerea la radiații ionizante.

Celulele lipsite de elemente nutritive sunt mai radiorezistente. Reparația leziunilor PLD a fost observată, de asemenea, și *in vivo* la celulele parenchimatice și la cele din măduva osoasă.

10.10. Mediatorii acțiunii radiațiilor la nivel celular

1. Acțiunea indirectă. Radicalii OH° aduc prejudiciu din două considerente:

Cunoscând proprietățile radicalilor OH° , putem spune că ei sunt oxidanții esențiali creați de radioliză. Studiile efectuate ne demonstrează că acești radicali integrează toate componentele celulei: în soluție molară, calea parcursă în mediu de radicalii OH° este de 10 Å. Agenții sensibilizatori sunt oxidanți puternici.

Utilizarea „capturaților de radicali” în sistemul celular *in vitro*. În cercetările efectuate de Johansen și Howard-Flanders, Sanner și Phil asupra *Escherichia coli* i se acordă o atenție deosebită acestei teme.

Într-un articol publicat recent de David Eving se indică absența corelației dintre concentrația radicalilor OH° , D_q și panta curbei de supraviețuire a celulelor V_{79} la hamsterii chinezi. În soluții cristaline la $t^\circ=77^\circ\text{K}$ se observă acțiunea radicalului liber OH° asupra carbonului, de asemenea, interacțiunea lui cu grupele metil, cu formare de radical alchil.

Așadar, de unde apar radicalii OH° *in vivo*? Sunt oare suficient hidratați fosfații de ADN pentru ca probabilitatea de creare a lor la acest nivel să fie importantă? Se știe că ADN conține molecule de apă ce nu pot fi ușor substituite cu molecule organice, deoarece circa 15% din apă este necesară pentru a menține structura elicoidală a ADN-ului.

2. Acțiunea directă. Pentru a crea un cuplu de ioni e nevoie în aer de 33 eV și 6 excitații concomitente ale ionilor. Dacă 1eV constituie $96,4\text{kJ} \times \text{mol}^{-1}$ sau $23 \text{kcal} \times \text{mol}^{-1}$, atunci 33 eV va fi egal cu 759 kcal. Energiile eliberate sunt suficiente pentru a se produce reacțiile chimice posibile, deoarece în apă energia necesară pentru ionizare nu trebuie să depășească 20 eV. Energia medie de legătură trebuie să fie de $110 \text{kcal} \times \text{mol}^{-1}$. Transmiterea energiei este aleatoare, dar depinde de densitatea coloanei energetice; atomii supraîncărcați au probabilitatea de a fi ionizați în ordine descrescătoare: P, O, N, C, H.

1Gy – 1J/kg

1 Gy creează $1,89 \times 10^{17}$ cupluri de ioni pe un dl, deci 10^{-6} cupluri de ioni pe un lanț elementar de ADN ($1\text{dl} = 10^{27}\text{A}^3$, lanțul elementar al ADN-ului = $202 \times 17 \times 3,14 / 4 = 5340 \text{A}^3$).

Admitem că ADN-ul celulei eucariote parcurge 2 m, atunci vor fi 1000 de lovituri pe Gy de raze slabe TEL. Astfel aceste raze nu acționează la fel ca razele a căror TEL este mare. Totuși loviturile în țintă nu vor fi suficiente pentru a crea o curbură dublă, deoarece absorbția energiei eliberată de razele gama ^{60}Co se efectuează în microregiuni cu diametrul nu mai mare de 2A , ce conțin energie de 30-120eV, sau 1-4 cupluri de ioni ori 2-8 radicali. Crearea entităților reactive nestabile ca și radicalii liberi nu face decât să catalizeze oxidarea ADN-ului. Sunt posibile numeroase schimbări naturale (dilema lui Erwin Schroedinger, 1945):

- în fiecare celulă se rup zilnic 5000 de baze pure cu legătura N-glicozil dezoxiriboză;
- zilnic 100 citozine se transformă în uracil.

Unii autori abordează problema în manieră teoretică, simulând reacțiile prin calcul pornind de la libertatea electronilor Auger și bazele unde sunt încorporați, emiterea electronilor Auger a căror rază scurtă de acțiune este bine cunoscută. În urma reacției dezoxiriboză-monofosfat apare curbura indirectă cu un produs secundar, care ulterior nu poate reacționa. Curburile duble sunt considerate ca o conjuncțiune de două curburi simple la o depărtare de 20 perechi de baze. Aceste simulări sunt realizate cu sau fără inhibitorii de radicali. Pentru ionii supraîncărcați problema este diferită, ei devin balistici.

Capitolul 11. **ESTIMĂRI DE RISC**

Riscul relativ este o măsurare a puterii relației dintre factorii de risc și cancer. În ceea ce privește cancerul de sân, el compară riscul de apariție a cancerului mamar la femeile cu o anumită expunere sau caracteristică, cu riscul de dezvoltare a cancerului de sân la femeile fără această expunere sau caracteristică.

Riscul atribuibil, cunoscut de asemenea ca **risc absolut**, se referă la diferența absolută în incidența cancerului mamar la femeile cu o anumită expunere sau caracteristică și la cele fără această expunere (care nu prezintă această expunere sau caracteristică). Spre exemplu: femeile care utilizează în

mod curent contraceptive orale și cele care le-au folosit prima dată la vârsta de 25-29 de ani au un risc relativ de dezvoltare a cancerului de sân egal cu 1:16. Aceasta înseamnă că ele au o probabilitate de a dezvolta cancer de sân cu 16% mai mare decât cele care nu au utilizat niciodată contraceptive orale.

Incidența cancerului de piele este proporțională cu suprafața pielii expusă la radiația ionizantă și de asemenea la raze ultraviolete (RUV). Estimarea riscului absolut pentru pielea corpului expusă la RUV, pe o suprafață totală de aproximativ 3000 cm², este de $6,7 \times 10^{-4}$ per persoană în gray (Gy). Pentru pielea protejată de RUV, reprezentând o suprafață totală de aproximativ 15000 cm², acest risc este estimat la $2,0 \times 10^{-4}$ per persoană în gray. Riscul total este estimat la $8,7 \times 10^{-4}$ per persoană în gray atunci când toată pielea corpului este expusă la radiația ionizantă (Shore, 1990).

Riscurile au fost estimate prin însumarea riscurilor pentru zonele expuse la RUV și pentru zonele ecranate, prin medierea riscurilor pentru ambele sexe și presupunând o letalitate a cancerelor de piele radioinduse de 0,2%. Nu se presupune o reducere a riscului pentru expunerile extinse pe o perioadă mai lungă de timp chiar dacă o astfel de reducere este foarte probabilă. Riscurile de cancer mediate pe întregul corp pentru o durată de viață activă de la 18 ani la 64 de ani sunt date în *tabelul 1*. Acestea sunt selectate din raportul Grupului de Lucru pentru Piele (Task Group on Skin) (ICRP, *tabelul 19*) în care estimările de risc sunt date pentru o varietate de situații (*tabelul 20* și *fig. 86*).

Tabelul 19

Risc absolut și relativ pentru cancer indus în piele

	Probabilitate (10^{-2} Sv^{-1})	
	Incidență	Mortalitate
Model de risc absolut	2,3	0,005
Model de risc relativ	9,8	0,02

Durata vieții active este de la vârsta de 18 ani la 64 de ani. Mortalitatea este fundamentată pe un raport al frecvenței de 5:1 pentru carcinoame celulare bazale (0,01% mortalitate) la carcinoame celulare scuamoase (1% letalitate).

Este preferabilă estimarea riscului de cancer fatal, derivată din modelul de risc relativ, și anume $2 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$. Doza ar trebui evaluată la adâncimea stratului celular bazal care variază între 20 μm și 100 μm pe întregul corp (*tabelul 20*).

Modele de corelare între perioada de expunere, populație și efecte

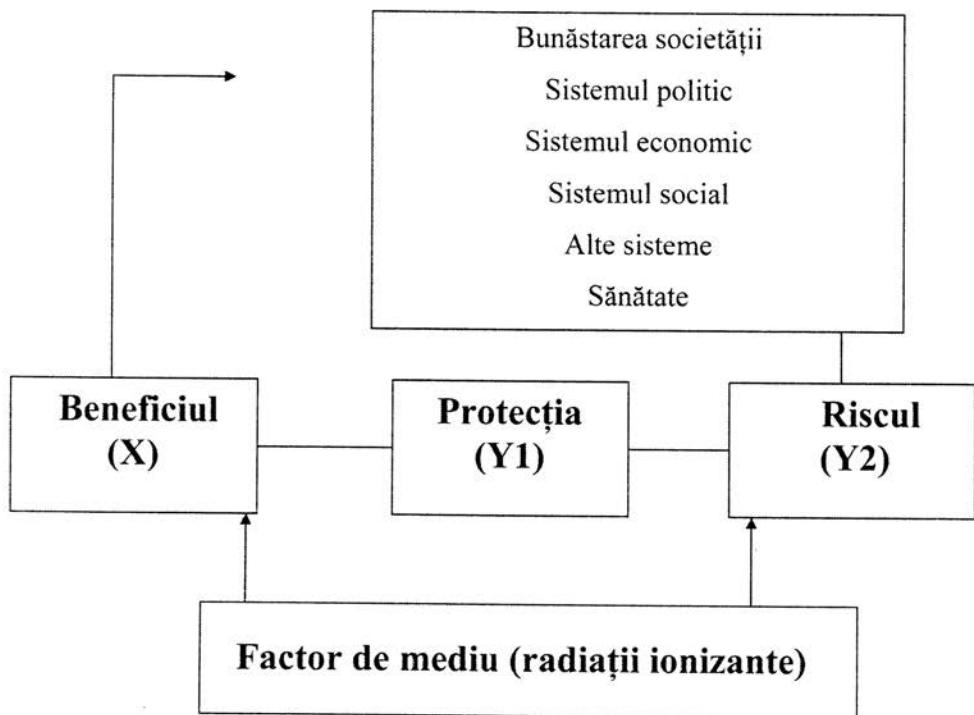
Efect	Populație	Perioada de expunere	Mod de expunere	Probabilitate
Radiație cu TLE mică				
Efecte mintale				
- Reducerea IQ	Fetus	Săptămânile de gestație 8-15	Doză mare, debit de doză mare	30 puncte IQ Sv ⁻¹
- Retard mental sever	Fetus	Săptămânile de gestație 8-15	Doză mare, debit de doză mare	4×10^{-2} la 1 Sv
Ereditare				
Efecte ereditare severe, incluzând boli multifactoriale	Întreaga populație	Toate generațiile	Doză mică, debit de doză mic	$1,0 \times 10^{-2}$ Sv ⁻¹
Cancer				
Cancere fatale (total)	Populația activă ocupată	Durata vieții	Doză mică, debit de doză mic	$2,0 \times 10^{-2}$ Sv ⁻¹
Cancere fatale (total)	Populația în general	Durata vieții	Doză mică, debit de doză mic	$5,0 \times 10^{-2}$ Sv ⁻¹
Cancer fatal (în organe specifice)	Populația activă ocupată	Durata vieții	Doză mică, debit de doză mic	400×10^{-4} Sv ⁻¹
Piele (fatal)	Populația în general	Durata vieții	Doză mare sau mică, debit de doză mic	2×10^{-4} Sv ⁻¹

Detrimentul Agregat pentru sănătate (în organe specifice)		Durata vieții	Doză mică, Debit de doză mic	
Factori de ponderare tisulari				1,0
Radiație cu TLE mare				
Riscurile ereditare și pentru cancer sunt aceleași ca și pentru radiația cu TLE mic, utilizînd w_R pentru evaluarea dozei eficace sau echivalente				
Radon: Cancere pulmonare fatale	Populația activă ocupată	Durata vieții		$(1-4) \times 10^{-4}$ NLL ⁻¹ (3-10) per Jhm ⁻³

Tabelul 21

Scăderea medie a duratei de viață (în zile) ca urmare a expunerii la unii factori moderni de risc (după Cohen, R. and Lee, I. S. și V. Patrașcu, 1996)

Bărbat necăsătorit	3500
Fumător	2250
Femeie necăsătorită	1600
Greutate supraponderală	1300
Miner	1100
Fumătoare	800
Activități periculoase	300
Accidente rutiere	207
Alcool	130
Accidente casnice	95
Abuz de medicamente	90
Înec	41
Activități cu radiații ionizante	40
Incendii	27
Radiații naturale	8
Radiografii medicale	6
Cafea	6
Accidente de CNE	0,02



$$X - (Y1 + Y2) > Z_{\max}$$

Fig. 86. Balanța beneficiu-risc.

Partea III.

REGLEMENTAREA IGIENICĂ A EXPUNERII ORGANISMULUI UMAN LA RADIAȚII IONIZANTE

Capitolul 12.

NOȚIUNI GENERALE

Orice organism viu de pe Terra este expus radiației de la sursele naturale și artificiale. De aceea sistemul de protecție radiologică are un scop bine definit și trebuie să cuprindă toate situațiile și activitățile umane în cadrul cărora are loc expunerea la radiații ionizante.

La baza criteriilor de radioprotecție a persoanelor expuse profesional la radiații ionizante și a populației în întregime stau datele privind efectele biologice ale factorilor radiologici. Asigurarea radioprotecției necesită implementarea unui complex de diverse măsuri, care depind de condițiile concrete de activitate cu sursele de iradiere ionizantă și în primul rând de tipul sursei.

Surse de radiație ionizantă servesc: materialele, echipamentele, dispozitivele, instalațiile capabile să producă câmpuri de radiații ionizante. După tipul sursei se deosebesc: surse închise și surse deschise de radiații.

Sursa închisă reprezintă orice sursă, material radioactiv încorporat într-un material nedispersabil sau închis într-un înveliș etanș, suficient pentru a împiedica orice dispersare a materialului radioactiv și orice posibilitate de contaminare radioactivă.

Sursa deschisă reprezintă orice material radioactiv care în condiții de utilizare se poate dispersa provocând contaminarea radioactivă a mediului de lucru, a suprafețelor.

După originea lor, sursele de radiații ionizante se clasifică în:

- a) surse naturale;
- b) surse artificiale.

Sursele naturale sunt surse de radiații existente în condiții naturale, inclusiv radiațiile cosmice și telurice (gama terestre).

Sursele artificiale constituie instalații, generatoare de radiații create și utilizate de om în diferite domenii de activitate, inclusiv medicină, industrie, agricultură, energetică, știința etc.

Generatoarele de radiații ionizante sunt instalații care generează iradieri, precum razele X, neutronii, electronii sau alte particule încărcate, care pot fi utilizate în scopuri științifice, industriale, medicale și în alte domenii (geologie, agricultură, construcții etc.).

12.1. Surse artificiale de radiații

Iradierea artificială este produsă de utilizări de către om a radiațiilor ionizante provenite de la sursele artificiale. Utilizarea acestora în diferite scopuri face ca expunerea la radiații ionizante să prezinte o creștere în ultimele decenii, de aici rezultând și necesitatea introducerii măsurilor de protecție corespunzătoare în vederea înlăturării efectelor nocive ale lor.

În funcție de modul de expunere la sursele artificiale de radiații ionizante distingem expunerea profesională și expunerea publicului.

Expunerea profesională vizează persoanele care în procesul muncii vin în contact cu radiațiile ionizante, în această categorie incluzând: personalul care lucrează la extragerea minereului radioactiv și la obținerea de combustibil nuclear, personalul din centralele electrice nucleare, personalul de la reactoarele nucleare, cei care lucrează în cercetarea științifică, personalul care lucrează cu surse radioactive în medicină, în diferite procese industriale etc. Un domeniu în care expunerea profesională cuprinde până în prezent cel mai mare număr de oameni este folosirea radiațiilor ionizante în medicină, în scop de diagnostic sau terapeutic. În această grupă intră tot personalul din unitățile de radiodiagnostic, radioterapie și medicină nucleară.

Expunerea publicului cuprinde populația care nu vine în contact în procesul muncii cu radiații ionizante, dar care prin diferite căi poate fi expusă la radiații ionizante.

Iradierea artificială cunoaște următoarele cauze principale: utilizarea industrială și tehnică a radiației ionizante, utilizarea radiațiilor ionizante în medicină (iradierea medicală a populației), la care se adaugă utilizarea unor surse de radiații de către populație și experimentarea armelor nucleare.

Utilizarea radiațiilor ionizante în industrie, tehnică și știință poate crește expunerea populației prin poluarea radioactivă a mediului. Reziduurile radioactive pot pătrunde în aer, apă și sol, realizând pe aceste căi o contaminare directă a populației sau din aceste elemente de mediu pot să se acumuleze în organismele vegetale și animale, pătrunzând astfel în lanțurile trofice ale omului. În afara unor situații accidentale, expunerea populației la radiații ionizante pe această cale se situează chiar în țări cu industrie radioactivă (îndeosebi centrale electro-nucleare), dezvoltată la niveluri relativ mici (aproximativ 50 $\mu\text{Sv}/\text{an}$).

Iradierea medicală reprezintă cea mai importantă sursă de iradiere artificială pentru populație. Ea provine din examenele de radiodiagnostic (radioscopii și radiografii), din radioterapie și din utilizarea izotopilor radioactivi în scopuri diagnostice și terapeutice.

Contribuția, pe care o aduce radiodiagnosticul în stabilirea diagnosticului, a indicațiilor terapeutice și a prognosticului, a făcut ca în toate țările să se observe o creștere a numărului de examene radiologice. Trebuie de avut în vedere, însă, faptul că orice examen radiologic este însoțit și de o creștere a expunerii la radiații ionizante, implicând un risc potențial pentru cel examinat.

În cursul examenelor de radiodiagnostic cantitatea radiației primite în cursul unei radiografii este sensibil mai mică decât cea primită în cursul radioscopiilor. Nivelul de iradiere depinde, de asemenea, de parametrii de energie utilizată, precum și de durata examinării (expunerii), și de dimensiunea câmpului expus.

Din punctul de vedere al riscului pentru sănătate, un alt aspect important îl reprezintă zona iradiată, măduva hematogenă și gonadele, fiind cele mai sensibile (estimarea riscului se face pe baza dozei cu semnificație genetică sau medulară), precum și vârsta sau starea fiziologică a persoanelor expuse (copiii și femeile în perioada de maternitate prezintă riscul maxim).

Media dozelor cu semnificație genetică primită de ansamblul populației în țările dezvoltate constituie 0,2 mSv pe an la un locuitor. Utilizarea radioizotopilor în medicină nu aduce pe ansamblul populației decât valori medii reduse la cea de 2 μ Sv pe an.

În ceea ce privește radioterapia în cazul afecțiunilor maligne, riscul în raport cu beneficiul este neînsemnat, dozele medii anuale sunt greu de estimat datorită speranței reduse de viață, iar riscul genetic prin probabilitatea redusă de procreare este practic nul. Aplicarea radioterapiei în afecțiunile benigne este important de luat în considerare în radioprotecție, dozele medii anuale estimate situându-se în jurul valorii de 0,04 mSv.

În ansamblu, deci, în țările cu rețea medicală dezvoltată iradierea medicală medie anuală a populației este estimată la 0,25-0,30 mSv. Aceleași doze în Republica Moldova se află în limitele care sunt caracteristice pentru țările dezvoltate (*fig. 87*).

Dozele cu semnificație genetică provenite din radiodiagnostic constituie 0,23 mSv pe an la un locuitor. Utilizarea unor surse de radiație de către populație poate fi considerată chiar în cazul efectelor genetice ca neînsemnată. Sunt de menționat ceasurile cu cadran luminescent, care pot realiza o iradiere slabă la nivelul articulației pumnului, riscurile fiind însă mai mari pentru lucrătorii care aplică vopsele luminescente.

În vederea reducerii iradierii și prevenirii inducerii cancerului la piele, de peste 20 de ani s-a renunțat la folosirea vopselelor cu radium-226 (emițător de

radiație de energie mare). Doze mici de radiație în general cu energie mică emit și alte aparate, cum ar fi aparatele de bord la care s-au folosit vopsele luminescente.

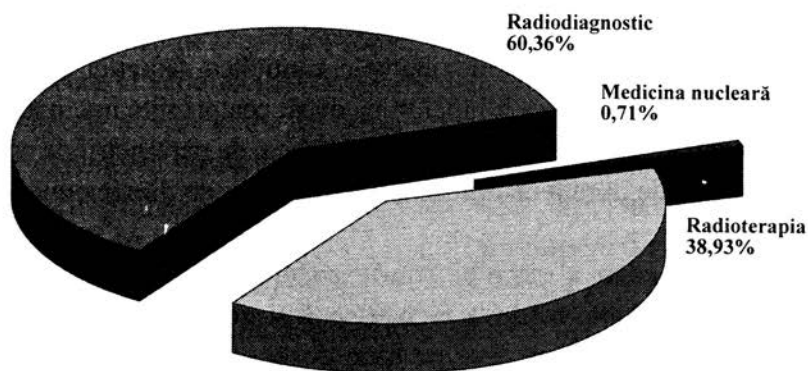


Fig. 87. Ponderele diferitor surse artificiale utilizate în iradierea medicală în Republica Moldova.

Ecranele receptoarelor de televiziune sunt surse care, de asemenea, emit radiații ionizante. Televizoarele emit radiații X puțin penetrante, la 1,5-2 m de ecran radiația fiind nemăsurabilă. Radiații X ceva mai penetrante emit televizoarele color, dar sistemele de protecție (în special la nivelul dispozitivului de reglare de tensiune) evită expunerea semnificativă la radiație ionizantă a telespectatorilor.

Experimentarea armelor nucleare în aer, apă și pe sol a dus la acumularea în atmosferă a unor radionuclizi cu viață lungă, ca de exemplu Sr-90 și Cs-137, care continuă să se depună pe sol, crescând iradierea realizată atât direct, cât și indirect prin trecerea în lanțurile trofice ale animalelor și a omului.

Sistarea experiențelor în aer, apă și pe sol a condus la reducerea nivelurilor de iradiere, însă depozitele realizate continuă să genereze o discretă creștere a iradierii naturale, cu perspectiva de a dura încă câteva decenii. Astfel, până în 1967 $\frac{2}{3}$ din iradierea internă produsă de Cs-137 și $\frac{1}{2}$ din iradierea externă se realizase, în timp ce numai $\frac{1}{10}$ din doza de C-14 a fost recepționată de om până în anul 2000. Contaminarea pe această cale nu poate fi redusă semnificativ, singură soluție fiind încetarea experimentărilor. Un aport semnificativ în iradierea populației de la sursele tehnogene l-a avut producerea exploziilor nucleare ale bombelor aplicate asupra orașelor Hiroshima și Nagasaki din Japonia și în anul 1986 a accidentului nuclear de

la Centrala Atomo-Electrică Cernobîl, când au fost contaminate suprafețe mari din teritoriul diferitor țări.

12.2. Sursele naturale de radiații

Conform Raportului Comitetului Științific al Națiunilor Unite asupra Efectelor Radiațiilor Atomice (UNSCEAR), 1993, sursele naturale de expunere se împart în:

- surse aflate în afara organismului uman;
- de origine extraterestră (radiația cosmică);
- de origine terestră (radiațiile emise de radionuclizi existenți în scoarța pământului, în aer, apă, în materiale de construcție, vegetație etc.);
- surse existente în interiorul organismului, reprezentate de radionuclizii pătrunși în organism prin inhalare, ingestie și prin piele.

Echivalentul mediu anual de doză efectivă (EDE) pentru populația Republicii Moldova, datorat surselor naturale, constituie în medie:

- pentru iradierea cosmică – 0,35 mSv/an (10,09%);
- pentru gama telurică – 0,38 mSv (10,96%);
- pentru ingestie – 0,27 mSv (7,79%);
- pentru inhalare (Radon, Toron + descendenți) – 1,50 mSv (43,28%).

Aportul total al surselor naturale în doza de expunere a populației constituie 72,12%. O parte considerabilă a acestei doze omul o primește în timpul aflării în locuințe și încăperi de producție, unde conform datelor UNSCEAR se află circa 80% din timp. În încăperi omul este supus acțiunii atât a iradierii externe-gama, cât și iradierii interne, ca urmare a inhalării produselor descendente ale Radonului.

În Republica Moldova, în scopul reglementării iradierii populației de la sursele naturale (fondul radioactiv natural și tehnogen-schimbat), a fost elaborat și este în vigoare „Regulamentul și normele igienice privind reglementarea expunerii la radiații a populației de la sursele naturale”. Principiul care a stat la baza elaborării acestui document este diminuarea iradierii de la sursele naturale până la un nivel minim posibil. În Regulament este stabilit sistemul de criterii pentru adoptarea deciziilor (CAD), orientate spre diminuarea dozelor de iradiere a populației în spațiile locative, edificiile cu menire social-culturală și pentru unele îngrășăminte minerale. Regulamentul stabilește nivele admise ale activității efective specifice a radionuclizilor naturali (RNN) în îngrășăminte minerale, materiale de construcție, debitul dozei echivalente (DDE) al iradierii externe-gama, concentrația echivalentă de echilibru

(CEE) medie anuală a Radonului-222 în aerul încăperilor. De asemenea, sunt prevăzute măsuri privind ordinea efectuării controlului calității materialelor de construcție. Nivelele admise corespund cerințelor „Standardelor Internaționale de Bază” aprobate de Agenția Internațională pentru Energia Atomică (AIEA), „Recomandărilor Consiliului European” (EUROATOM) și „Normelor Fundamentale de Radioprotecție” (NFRP-2000).

Pe teritoriul Republicii Moldova fondul natural de expunere gama este determinat de radionuclizii naturali din compoziția rocilor (radiația telurică), radiația cosmică, radiația naturală și artificială (provenită din precipitățile globale ale radionuclizilor artificiali, apărute atât în urma testelor armelor nucleare în anii 1950–1970 și la începutul anilor 80, cât și în urma accidentului nuclear de la Centrala Atomo-Electrică Cernobâl din a.1986), determinate în aerosol și în elementele mediului ambiant. În afară de aceasta, la ponderea fondului se mai referă și degajările în mediul ambiant ale produselor de ardere a combustibilului organic de la Centralele Termoelectrice teritoriale, uzinele de fabricare a materialelor de construcție, gazele de eșapament de la transportul auto și transportul transfrontalier al maselor poluate de aer.

O pondere semnificativă a dozei de la radiațiile ionizante, la care este expusă zilnic populația Republicii Moldova în condiții de habitat normal, provine de la sursele naturale. Substanțele radioactive naturale mai importante sunt elementele din familia uraniului, thoriului și izotopii potasiului. Expunerea la radiația gama de origine telurică are loc atât în exteriorul locuinței (aerul liber), cât și în interiorul ei. Radiația gama emisă de radionuclizii naturali din materialele de construcție are o contribuție semnificativă la iradierea populației. Însă sursa majoră de expunere a populației la fondul natural radioactiv o constituie descendenții de viață scurtă ai radonului și toronului (^{222}Rn , ^{220}Rn), fiind prezenți pretutindeni în aerul atmosferic. Principalele surse de radon și toron în locuință sunt: solul subiacent clădirii, materialele de construcție, apele menajere de origine arteziană, gazul metan, aerul exterior.

Ca surse de iradiere internă, sunt considerați radionuclizii naturali și artificiali încorporați în organismul uman în urma ingestiei și inhalării (K^{40} , U^{238} , Th^{232} , Ra^{226} , (Rn^{222} , Rn^{220}), Pb^{210} , Po^{210} , Cs^{137} , Sr^{90} ș.a.). Doza individuală medie anuală pentru Republica Moldova datorată acestor surse este de circa 2,5 mSv (tabelul 22). Radiațiile de origine terestră reprezintă 84,0% (circa 2,0 mSv), iar cele de origine cosmică 16,0 % (circa 0,4 mSv din această doză medie anuală) (UNSCEAR, 2000).

**Echivalentul de doză efectivă anuală pentru populația
Republicii Moldova de la diferite surse**

Surse de iradiere		EDE mediu per capita		Subtotal pondere, %	Total pondere, %
		Iradiere internă, mSv/an	Iradiere externă, mSv/an		
Naturală		2,494			71,9
	Radiația cosmică		0,35	10,1	
	Gama terestră		0,376	10,8	
	Ingestie K-40, U-238, Ra-226	0,266		7,7	
	Inhalarea Radon + desendenți	1,502		43,3	
Artificială		0,975			28
	Radiodiagnosticul medical		0,588	16,9	
	Medicina nucleară	0,007		0,2	
	Radioterapia		0,38	10,9	
	Profesională	0,001		0,1	0,1
Total:		1,775	1,695		100
		3,47			

Monitorizarea tuturor întreprinderilor, instituțiilor și organizațiilor, ministerelor și departamentelor preocupate de extragerea minereurilor, fabricarea din ele a materialelor de construcție, construirea și exploatarea edificiilor locative și a celor cu destinație social-culturală, utilizarea îngrășămintelor minerale este efectuată permanent conform clasificării obiectivelor de construcție expuse în continuare.

12.3. Categoriile de persoane expuse la radiații ionizante

Conform „Normelor Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” (NFRP-2000) și ținând cont de beneficiul mare adus de energia nucleară, principiul fundamental de profilaxie a expunerii în doze mari la radiații

este categorizarea persoanelor expuse și reducerea la minim a riscului. Pentru prevenirea apariției efectelor somatice și genetice au fost stabilite nivelurile maxime de expunere și categoriile de persoane iradiate.

Din acest punct de vedere, populația se împarte în 2 categorii:

- 1) *persoanele expuse profesional la radiații ionizante;*
- 2) *publicul în general.*

Persoanele expuse profesional reprezintă persoane care activează nemijlocit cu sursele de iradiere ionizantă permanent sau temporar.

Publicul în general include toată populația republicii. Din public fac parte și persoanele, reprezentând grupul de populație care locuiește sau activează permanent în jurul unor obiective nucleare, și persoanele, care îngrijesc temporar sau vizitează pacienții în instituțiile medicale.

Pentru prima categorie s-au stabilit doze maxime admisibile, care reprezintă doza primită de întregul organism, de un organ sau țesut și care în iradierea externă sau internă nu produce efecte somatice pe parcursul vieții individului.

12.4. Clasificarea obiectivelor de construcție

Grupa 1. Obiectivele locative, de menire social-culturală sau industrială construite, reconstruite sau după o reparație capitală la primirea lor în exploatare.

Grupa 2. Obiectivele locative, de menire social-culturală, industrială sau altă menire primite în exploatare până la adoptarea regulamentului.

Grupa 3. Obiectele industriale și drumuri unde este exclusă aflarea de durată lungă a persoanelor și construirea drumurilor în perimetrul teritoriului zonelor de trai și a zonelor cu perspectivă de construcție.

Grupa 4. Unele obiecte izolate de tip închis sau deschis cu menire industrială, drumuri, obiecte subterane ș.a. a căror exploatare nu este legată de aflare sau care în perimetrul zonelor de trai sunt acoperite cu un strat de pământ sau alt material cu o grosime nu mai mică de 0,5 m.

În funcție de clasificarea obiectivelor expusă mai sus, nivelele admise ale parametrilor igienico-radiologici reglementați nu trebuie să depășească valorile indicate în *tabelul 23*:

**Nivelele admise ale parametrilor reglementați ai radioactivității
naturale pentru obiectele de construcții**

Parametrii igienico-radiologici reglementați	Nivelele admise pentru grupele obiectelor de construcție			
	1	2	3	4
Debitul dozei echivalente în încăperi, mSv/h	< 0,25	< 0,5	Nu se normează	Nu se normează
Activitatea echivalentă medie anuală pe volum a Radonului în aerul încăperilor, Bq/m ³	< 100	< 150	Nu se normează	Nu se normează
Activitatea efectivă specifică a radionuclizilor naturali (A_{eff}) în materialele de construcție	< 300 clasa - I	< 600 clasa - II	<1350 clasa - III	Nu se normează

Capitolul 13.

**STRUCTURILE DE REGLEMENTARE ÎN DOMENIUL
RADIOPROTECȚIEI ȘI SECURITĂȚII NUCLEARE**

Infrastructura din domeniul activităților nucleare și radiologice este reglementată de legislația în vigoare.

13.1. Componentele infrastructurii din domeniul activităților nucleare și radiologice sunt:

- a) Agenția Națională de Reglementare a Activităților Nucleare și Radiologice;
- b) organele cu atribuții în domeniul activităților nucleare și radiologice;
- c) persoanele fizice și persoanele juridice autorizate în domeniul activităților nucleare și radiologice sau al efectuării măsurărilor radiologice;
- d) resursele umane de calificare corespunzătoare în domeniu, inclusiv în cadrul sistemului de formare și perfecționare profesională;
- e) instituțiile de cercetări de profil.

13.2. Organele cu atribuții în domeniul activităților nucleare și radiologice sunt:

- 1) Agenția Națională de Reglementare a Activităților Nucleare și Radiologice;
- 2) Autoritatea administrației publice centrale în domeniul medicinei;
- 3) Autoritatea administrației publice centrale a situațiilor excepționale;
- 4) Autoritatea administrației publice centrale abilitată cu protecția mediului;
- 5) Autoritatea administrației publice centrale în domeniul agroindustrial;
- 6) Serviciul Vamal;
- 7) Serviciul Standardizare și Metrologie;
- 8) Camera de Licențiere;
- 9) Academia de Științe a Moldovei;
- 10) Comitetul Național de Radioprotecție de pe lângă Guvern.

13.3. Legislația și actele normative în domeniul radioprotecției și securității radiologice și nucleare din Republica Moldova

Elaborarea legislației din domeniul radioprotecției și securității radiologice și nucleare s-a început odată cu obținerea independenței Republicii Moldova. La momentul actual, ea se află într-un proces de armonizare la cerințele și recomandările internaționale, în special a documentelor AIEA - GS-R-1 (Infrastructura Juridică de Stat a Securității Nucleare și Radiologice, Securității Deșeurilor Radioactive și Securității Transportării Materialelor Radioactive, Codul de Conduită privind Asigurarea Securității și Siguranței Surselor Radioactive, și Materialele de Referință la Importul și Exportul Surselor Radioactive 2004), cât și alte documente normative internaționale.

a) **Cadrul legislativ în Republica Moldova** este reprezentat prin Legi, Hotărâri de Guvern, acte normative ministeriale și departamentale, Reglemente specifice.

1. Legi:

Legea privind desfășurarea în siguranță a activităților nucleare și radiologice nr. 111-XVI din 11.05.2006

Prezenta lege are ca obiect:

- a) neproliferarea armelor nucleare, securitatea și menținerea ei la nivel înalt în orice activitate de utilizare a materialelor radioactive și surselor de radiații ionizante, prevenirea utilizării neautorizate a acestora și a deșe-

urilor radioactive, inclusiv a combustibilului nuclear, în conformitate cu obligațiile Republicii Moldova ce decurg din Acordul de neproliferare a armelor nucleare și cu obligațiile din cadrul altor convenții internaționale la care Republica Moldova face parte;

- b) protecția personalului, populației, bunurilor și mediului ambiant împotriva acțiunii nocive a radiațiilor ionizante în conformitate cu standardele internaționale de bază pentru protecția contra radiațiilor ionizante și securitatea surselor de radiații ionizante.

În conformitate cu prevederile acestei legi autoritatea administrației publice centrale în domeniul medicinei efectuează:

- a) supravegherea și evaluarea igienică a conținutului de radionuclizi în produsele alimentare, pe întregul circuit alimentar, în apa potabilă, inclusiv în sursele de apă potabilă, în materialele de construcție, în alte bunuri de consum destinate populației, cu eliberarea certificatelor de igienă pentru produsele autohtone sau cele provenite din import;
- b) monitorizarea influenței activităților nucleare și radiologice asupra sănătății populației și emiterea de avize, în conformitate cu actele normative în vigoare;
- c) normarea igienică a factorilor radiologici;
- d) supravegherea sanitaro-epidemiologică a obiectivelor ce desfășoară activități nucleare și radiologice, în conformitate cu prevederile legislației în vigoare;
- e) monitorizarea expunerii la radiații ionizante a personalului care activează cu surse de radiații ionizante, a pacienților în timpul investigațiilor medicale și a populației în cazuri de accidente radiologice (nucleare);
- f) organizarea cercetărilor științifice privind efectele medico-biologice ale radiațiilor ionizante.

Legea privind supravegherea de stat a sănătății publice, nr.10 din 03.02.2009

Legea reglementează organizarea supravegherii de stat a sănătății publice, stabilind cerințe generale de sănătate publică, drepturile și obligațiile persoanelor fizice și juridice și modul de organizare a sistemului de supraveghere de stat a sănătății publice.

Scopul prezentei legi este asigurarea condițiilor optime pentru realizarea maximă a potențialului de sănătate al fiecărui individ pe parcursul întregii vieți prin efortul organizat al societății în vederea prevenirii îmbolnăvirilor, protejării și promovării sănătății populației și îmbunătățirii calității vieții.

În conformitate cu prevederile prezentei legi sunt reglementate cerințele privind activitățile cu surse de radiații ionizante:

(1) Activitățile cu surse generatoare de radiații ionizante se vor desfășura cu respectarea prevederilor legislației în vigoare în domeniul activităților nucleare și radiologice, regulamentelor și normativelor sanitare în domeniul radioprotecției.

(2) Activitățile nucleare și radiologice, cu utilizarea substanțelor radioactive și a altor surse de radiații ionizante, sunt supuse supravegherii și autorizării sanitare.

(3) Personalul aflat în sfera acțiunii radiațiilor ionizante în cadrul practicilor de utilizare a materialelor radioactive și a altor surse de iradiere ionizantă, pacienții expuși la radiații în cadrul iradierii medicale și populația aflată în cadrul evenimentelor de urgențe nucleare și radiologice sunt supuși monitorizării permanente, cu determinarea dozelor de expunere la radiații ionizante.

(4) Persoanele fizice și juridice, care desfășoară activități nucleare, radiologice sunt obligate să asigure condiții pentru monitorizarea expunerii la radiații ionizante și estimarea stării sănătății angajaților, să creeze condiții sigure de muncă cu sursele de radiații ionizante.

Legea privind Licențierea unor Genuri de Activitate nr.451-XV din 30.07.2001

Articolul 8 stipulează genurile de activități supuse licențierii, care conține: Activitatea, legată de utilizarea surselor de radiații ionizante și a materialelor radioactive, managementul deșeurilor radioactive, transportarea surselor și materialelor radioactive, deservirea, repararea sau confecționarea instalațiilor cu surse de radiații ionizante și realizarea lucrărilor de radio-spectro-dozimetrie etc.

Legea privind controlul exportului, reexportului, importului și transportării prin tranzit a materialelor strategice, №. 1163-XIV din 26.07.2000;

Legea privind regimul produselor și surselor nocive, nr. 1236-XIII din 03.07.1997;

Legea cu privire la deșeuri, №. 1347-XIII din 09.10.1997;

Legea cu privire la protecția mediului înconjurător, nr. 1515 din 16.06.1993;

Legea cu privire la ratificarea Acordului între Republica Moldova și Agenția Internațională pentru Energie Atomică cu privire la aplicarea garanțiilor în raport cu Tratatul privind neproliferarea armelor nucle-

are și a Protocolului la acest acord. nr. 41, adoptat 02.03.2006, publicat în Monitorul Oficial nr. 047 din 24.03.2006.

2. Hotărârile Guvernului:

Hotărârea Guvernului RM №. 1017 din 01.02.2008 „Cu privire la Registrul național al surselor de radiații ionizante”;

Hotărârea Guvernului RM №. 1220 din 30.10.2008 „Privind aprobarea Regulamentului controlului și supravegherii de Stat a activităților nucleare și radiologice”;

Hotărârea Guvernului RM №. 477 din 19.05.2000 „Privind Rețeaua Națională de Observare și Control de Laborator asupra Poluării și Contaminării Mediului Ambient cu Substanțe Toxice și Radioactive”.

3. Acte normative:

Norme Fundamentale de Radioprotecție. Cerințele și Reguli Igienice (NFRP-2000, nr. 06.5.3.34 din 27.02.2001).

NFRP-2000 conține cerințele de asigurare a radioprotecției și securității radiologice la acțiunea radiațiilor ionizante și cerințele de siguranță a surselor de radiații ionizante, adoptate conform legislației Republicii Moldova. Acest act normativ este similar documentului BSS-115 al AIEA.

„Normele Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” includ principiile de bază în asigurarea radioprotecției și siguranței surselor de radiație ionizantă prin reglementarea unor norme specifice de radioprotecție, conform recomandărilor organizațiilor internaționale și a practicii acumulate în domeniile respective din republică pe parcursul ultimelor decenii.

„Normele Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” stabilesc măsurile de bază care necesită aplicare în toate situațiile și practicile, condiționate de expunerea la radiațiile ionizante naturale și artificiale, probabilitatea acțiunii expunerii asupra habitatului etc.

Un loc important în „Normele Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” îi revine normării concentrațiilor radionuclizilor în produsele și materia primă alimentară, apa potabilă și altor factori ai mediului ambiant, prevenției unor eventuale urgențe radiologice sau accidente (incidente) nucleare.

În conformitate cu cerințele științei și practicii moderne „Normele Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” evidențiază conținutul

tuturor măsurilor de rigoare pentru asigurarea radioprotecției personalului, pacienților și populației și excluderea riscurilor provocate de iradiere, limitarea dozelor de expunere la radiații în practica cu surse, instalații și generatoare de radiații ionizante.

„Normele Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” sunt destinate pentru utilizatorii surselor cu radiații ionizante, specialiștii-experti ai organelor de reglementare și publice locale, care efectuează controlul și supravegherea de stat, indiferent de apartenența lor departamentală.

Norme Fundamentale de transport în siguranță a materialelor radioactive și pentru tranzitul internațional al materialelor radioactive prin teritoriul Republicii Moldova (urmează a fi publicat în Monitorul Oficial).

Normele în cauză au fost elaborate în baza regulamentului tehnic al AIEA (IAEA-TS-R-1) „Regulations for Safety Transportation of Radioactive Material”.

4. Regulamente specifice

Regulamentul și Normele Igienice privind reglementarea expunerii populației la surse naturale nr. 06-5.3.35 din 05.03.2001

Aceste norme stabilesc criteriile de bază pentru reglementarea expunerii la radiații ionizante a populației de la sursele naturale (fondul radioactiv natural și tehnogen schimbat).

„Regulamentul și normele igienice privind reglementarea expunerii la radiații a populației de la sursele naturale” stabilește criteriile de bază pentru adoptarea deciziilor orientate spre diminuarea dozelor de iradiere a populației în spațiile locative și edificiile social-culturale prin stabilirea unor norme specifice ale radioactivității naturale a materialelor de construcție, a deșeurilor industriale, îngrășămitelor minerale etc.

„Regulamentul și normele igienice privind reglementarea expunerii la radiații a populației de la sursele naturale” stabilesc măsurile de bază care necesită a fi aplicate în condițiile și practicile condiționate de expunerea în exces la radiațiile ionizante naturale.

Acest Regulament este destinat experților-specialiști în radioprotecție și igiena radiațiilor, inginerilor și cercetătorilor instituțiilor de proiectare în construcții, conducătorilor și specialiștilor întreprinderilor preocupate de extragerea minereurilor, fabricarea materialelor de construcție, construirea și exploatarea edificiilor locative și cu destinație social-culturală, specialiștilor-ecologi, specialiștilor organelor de reglementare și publice locale.

Regulamentul este elaborat în conformitate cu prevederile „Normelor Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” Nr.06.53.34 din 27.02.2001.

„Regulamentul sanitar privind practicile de radiodiagnostic general și radiologie intervențională”

Acest regulament completează „Normele Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice” (NFRP-2000, Nr.06.5.3.34 din 27.02.2001) și reprezintă un capitol important în dezvoltarea infrastructurii radioprotecției și a securității surselor de radiații ionizante.

La elaborare s-a ținut cont de legislația comunitară aplicabilă și standarde europene cu prevederi similare în unele țări ale UE precum: Directiva 97/43/Euratom a Consiliului din 30 iunie 1997 privind protecția sănătății persoanelor împotriva pericolelor pe care le prezintă radiațiile ionizante rezultate din expunerea în scopuri medicale; Directiva 96/29/Euratom a Consiliului din 13 mai 1996 privind protecția sănătății lucrătorilor și a populației împotriva pericolelor prezentate de radiațiile ionizante.

Acest Regulament sanitar include cerințele referitoare la amplasarea, utilizarea și organizarea activității în secțiile și cabinetele de radiodiagnostic (exploatarea instalațiilor radiologice, utilizarea filmelor radiografice, reactivilor, ecranelor, casetelor și a mijloacelor individuale de radioprotecție), la asigurarea și la controlul calității în radiodiagnosticul medical, relevă principiile de bază ale radioprotecției – normarea, justificarea și optimizarea, asigurarea securității radiologice și securității muncii în timpul efectuării practicilor de radiodiagnostic.

Respectarea cerințelor, incluse în Regulamentul sanitar, este obligatorie pentru persoanele fizice și juridice, a căror activitate vizează efectuarea investigațiilor de radiodiagnostic. În regulamentul dat sunt prevăzuți factori specifici în activitatea secțiilor de radiodiagnostic.

13.4. Cadrul normativ internațional

BSS Safety Series nr.115-1 „International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources”.

Acest act normativ internațional reglementează radioprotecția personalului și a publicului de la acțiunea surselor de iradiere ionizantă în diferite domenii de activitate și stă la baza elaborării de către Statele Membre ale Agenției Internaționale pentru Energie Atomică a cadrului normativ național.

Directiva 97/43/Euratom a Consiliului din 30 iunie 1997 privind protecția sănătății persoanelor împotriva pericolelor pe care le prezintă radiațiile ionizante rezultate din expunerea în scopuri medicale.

Această directivă completează Directiva 96/29/Euratom și stabilește principiile generale de radioprotecție a persoanelor în ceea ce privește expunerea medicală. Directiva se aplică următoarelor expuneri în scop medical: expunerea pacienților în contextul unui diagnostic sau tratament medical; expunerea persoanelor în contextul medicinei muncii; expunerea persoanelor în contextul programelor de depistare medicală; expunerea persoanelor sănătoase sau a pacienților care participă benevol la programele medicale sau biomedicale, de diagnostic, terapie sau cercetare; expunerea persoanelor în cadrul procedurilor medico-legale.

Directiva se aplică, de asemenea, în cazul expunerii indivizilor care contribuie, în deplină cunoștință de cauză și benevol (fără ca aceasta să constituie profesiunea lor), la sprijinul și susținerea morală a persoanelor supuse unei expuneri în scopuri medicale.

Directiva 96/29/Euratom a Consiliului din 13 mai 1996 privind protecția sănătății lucrătorilor și a populației împotriva pericolelor prezentate de radiațiile ionizante.

Această Directivă reglementează practicile care implică riscuri datorate radiațiilor ionizante, emise de sursele naturale și artificiale, inclusiv:

- (a) producerea, prelucrarea, manipularea, utilizarea, deținerea, stocarea, transportul, importul și exportul din Comunitate și eliminarea substanțelor radioactive;
- (b) funcționarea oricărui echipament electric ce emite radiații ionizante și conține componente care funcționează la o diferență potențială de peste 5 kV;
- (c) orice altă practică desemnată de statul membru.

Prezenta directivă nu se aplică expunerii la radon în locuințe, nici fondului natural de radiații, de exemplu radionuclizilor din organismul uman, radiațiilor cosmice ce se manifestă la nivelul solului sau expunerii, deasupra solului, la radionuclizi din scoarța terestră neperturbată.

Capitolul 14.

REGLEMENTAREA EXPUNERII PROFESIONALE LA RADIAȚII IONIZANTE DE LA SURSELE ARTIFICIALE ȘI NATURALE

14.1. Principiile generale de radioprotecție

Sistemul de protecție radiologică recomandat de Comisia Internațională pentru Protecția Radiologică pentru practicile care sunt în desfășurare se bazează pe următoarele principii generale:

Justificarea practicilor – orice procedură (activitate) însoțită de utilizarea surselor artificiale de iradiere se interzice dacă consecințele acestora și daunele cauzate de radiații sunt mai mari decât beneficiul obținut. Nicio practică ce implică expuneri la radiație nu poate fi acceptată, decât dacă produce pentru indivizii expuși sau pentru societate un beneficiu suficient încât să compenseze detrimentul datorat radiației, cauzat de practică.

Deciziile referitoare la adoptarea și continuarea oricărei activități umane implică o alegere între opțiunile posibile și, adesea, se realizează în două etape. Prima etapă constă în examinarea separată a fiecărei opțiuni pentru a le identifica pe acelea care se speră să facă mai mult bine decât rău. Aceasta furnizează o „listă redusă” din care se poate selecta opțiunea preferată. A doua etapă, selecția finală, va înlocui adesea o practică existentă cu alta. Caracteristica relevantă va fi mai degrabă beneficiul net al modificării decât beneficiul net al fiecărei opțiuni separate. Atunci când se au în vedere practici ce implică expunere sau expunere potențială la radiație, detrimentul datorat radiației trebuie să fie explicit inclus în procesul de selecție. Detrimentul de luat în considerare nu se limitează la cel asociat cu radiația, ci include și alte detrimente și costuri datorate practicii. Adesea detrimentul datorat radiației va fi o mică parte a celui total. Astfel, justificarea unei practici depășește cu mult domeniul protecției radiologice. Acestea sunt motivele pentru care utilizarea termenului justificare necesită numai ca beneficiul net să fie pozitiv.

Procesul de justificare trebuie să fie utilizat nu numai la introducerea unei practici noi, dar și când practicile existente sunt revizuite în lumina unor informații noi privind efectele, consecințele și eficiența lor.

Limitarea dozei individuale și a riscului – interzicerea depășirii limitelor de doză, prevăzute de NFRP-2000 pentru personal (lucrători profesionali) și public. Expunerea indivizilor, rezultată din combinarea tuturor practicilor pertinente, trebuie să fie supusă limitărilor dozei sau unui oarecare control al riscului în cazul expunerilor potențiale. Acestea tind să asigure că niciun

individ nu este expus la riscuri din radiație, provenind din aceste practici, care sunt considerate inacceptabile în orice situație normală. Nu toate sursele pot fi controlate prin acționare asupra sursei, fiind, deci, necesar ca înainte de a alege limita dozei să fie specificate toate sursele incluse ca pertinente.

Optimizarea radioprotecției și siguranței – expunerea individuală la radiații ionizante de la orice sursă trebuie să fie justificată, iar nivelul expunerii la aceste radiații și numărul de indivizi expuși trebuie să fie minim. Referitor la orice sursă specifică dintr-o practică, mărimea dozelor individuale, numărul de persoane expuse și probabilitatea de a suporta expuneri la radiațiile ionizante ar trebui menținute toate la un nivel atât de scăzut, încât să poată fi realizabil în mod rezonabil, practic și luând în considerare factorii economici și sociali existenți (principiul ALARA).

De îndată ce o practică a fost justificată și adoptată, este necesar să se ia în considerare modul cel mai bun de utilizare a resurselor pentru reducerea riscurilor pentru indivizi și populație. Dacă următorul pas în reducerea detrimentului produs de radiații poate fi obținut numai prin alocarea unor resurse, care depășesc cu mult reducerea următoare, nu este în interesul societății să facă acest pas decât dacă indivizii au fost protejați corespunzător. Atunci se poate spune că protecția a fost optimizată și expunerile sunt atât de mici, încât să fie realizabile rezonabil, luând în considerare factorii economici și sociali. Procedura trebuie să fie, de asemenea, aplicată când este evaluată o practică deja existentă.

În cazuri de apariție a pericolului la utilizarea surselor, **intervenția se bazează pe următoarele principii:**

a) beneficiul pentru indivizii expuși trebuie să depășească daunele pe care le-ar putea cauza radiațiile ionizante, în așa mod, încât reducerea sau evitarea nivelului existent de expunere la radiații ionizante sau a probabilității de expunere trebuie să justifice pierderile economice și sociale ale acestei intervenții;

b) volumul și durata intervenției trebuie să fie de un astfel de nivel, încât beneficiul curat sau net (beneficiul de la minimalizarea daunelor radiaționale, cu excepția cheltuielilor utilizării intervenției) să fie maxim.

14.2. Limitele dozelor de expunere

Toate expunerile lucrătorilor la radiații ce apar în cursul muncii lor, cu excepția expunerilor excluse de Standardele de Bază de Securitate ale AIEA (BSS) și expunerile din practici sau surse exceptate de Standarde, trebuie

supuse unor astfel de restricții, încât niciuna din dozele totale (efectivă sau echivalentă) să nu depășească în unele țesuturi și organe ale organismului uman nicio limită de doză maximă. La utilizarea surselor de radiații ionizante în scopuri medicale controlul dozelor de expunere a pacienților este obligatoriu.

„Normele Fundamentale de Radioprotecție.Cerințe și Reguli Igienice” (NFRP-2000) în vigoare în Republica Moldova stabilesc următoarele limite de doze pentru expușii profesional la radiații ionizante:

1. Expunerea profesională:

A) Expunerea fiecărui lucrător trebuie controlată pentru a nu depăși următoarele limite:

1. doza efectivă de 20 mSv pe an, mediată pe 5 ani consecutivi;
2. doza efectivă de 50 mSv pe un an aparte, cu condiția că pe parcursul a 5 ani consecutivi doza medie nu va depăși 20 mSv an ;
3. pentru cristalinelul ochiului doza echivalentă de 150 mSv pe an;
4. pentru piele, extremități (mâini și picioare) – doza echivalentă de 500 mSv pe an.

B) Pentru persoanele având vârsta de 16-18 ani, care sunt expuse iradierii în scopul pregătirii și ulterior angajării la serviciu în condiții de iradiere, și pentru elevii și studenții având vârsta cuprinsă între 16-18 ani, care au necesitatea de a utiliza sursele de iradiere în scopul studiului, nu trebuie să depășească următoarele limite:

1. doza efectivă anuală de 6 mSv;
2. pentru cristașlin – doza echivalentă anuală 50 mSv;
3. pentru piele, extremități (mâini, picioare) – doza echivalentă anuală 150 mSv pe an.

Expunerea profesională în condiții speciale

Conform reglementărilor bazate pe Standardele de Bază de Securitate ale AIEA (BSS), pot fi aplicate cerințe temporare de limitare a dozelor în scopul diminuării expunerii tehnogene în condiții de inspectare. La confirmarea cerințelor temporare de limitare a dozelor, trebuie să se ia în considerare una din următoarele condiții:

a) perioada medierii dozei efective, care poate fi schimbată în cazuri excepționale de către organul de reglementare pentru o durată de până la 10 ani consecutivi. În acest caz doza efectivă a oricărui lucrător pentru această pe-

rioadă nu trebuie să depășească în medie 20 mSv pe an, iar pe orice an apar-
te – 50 mSv; dacă doza medie angajată de lucrător de la începutul perioadei
ajunge la 100 mSv, trebuie să se revadă condițiile existente;

b) schimbarea temporară a limitelor dozelor este efectuată de către orga-
nul public cu funcții de reglementare în domeniul radioprotecției și securității
nucleare și nu trebuie să depășească 50 mSv pentru orice an, iar durata schim-
bărilor este în vigoare nu mai mult de 5 ani.

Expunerea publicului

Expunerea publicului de la sursele utilizate nu trebuie să depășească limi-
tele dozelor utilizate pentru evaluarea dozelor medii ale grupurilor respective
de control:

1. doza efectivă – 1 mSv pe an;
2. în cazuri speciale – doza efectivă de 5 mSv pe an.

În cadrul expunerii medicale la radiații utilizatorii de surse și generatoare
de radiații sunt obligați să limiteze dozele de expunere până la nivelurile sta-
bilite de NFRP-2000 permise atât de persoanele care conștient și din proprie
dorință ajută pacienții supuși investigației de radiodiagnostic, medicină nu-
cleară și tratament cu radiații ionizante, cu excepția salariaților din domeniu,
cât și a vizitatorilor acestor pacienți. Expunerea persoanelor care îngrijesc și
vizitează pacienții în perioada stabilirii diagnosticului și aplicării tratamentu-
lui nu trebuie să depășească 5 mSv, iar a copiilor, care vizitează acești paci-
enți, – 1 mSv pe tot parcursul stabilirii diagnosticului și aplicării tratamentu-
lui cu radiații ionizante.

Limitele dozelor se utilizează la calcularea sumei dozelor expunerii ex-
terne într-o anumită perioadă de timp și a dozelor expunerii interne, provenite
de la radionuclizii încorporați în aceeași perioadă de timp. Durata pentru care
se calculează doza acumulată constituie 50 de ani pentru adulți și 70 de ani
pentru copii.

La evaluarea corespunderii limitelor dozelor trebuie să se calculeze suma
dozei echivalente personale a expunerii externe pentru o durată anumită și a
dozelor echivalente sau efective acumulate de la radionuclizii încorporați în
aceeași perioadă de timp.

14.3. Contaminarea suprafețelor. Limite admisibile

În cadrul activităților legate de utilizarea surselor de iradiere ionizantă și
în special a surselor deschise sunt posibile contaminările radioactive ale su-
prafețelor de lucru, precum și a îmbrăcămintei speciale de protecție. În acest

context se normează nivelurile admisibile de contaminare ale obiectelor sus-numite.

Nivelurile contaminării radioactive generale ale pielii sunt determinate luându-se în considerare pătrunderea unei porțiuni sau cantități de radionuclizi în piele și în organism. Calculul a fost efectuat cu condiția, că suprafața totală de contaminare nu trebuie să depășească 300 cm².

În *tabelul 24*) sunt expuse mărimile admise ale contaminării radioactive ale suprafețelor de lucru, pielii, îmbrăcăminte speciale, încălțăminte speciale, mijloacelor de protecție a personalului. Pentru ultimele patru categorii sus-menționate se normează contaminarea radioactivă generală (fixată și nefixată), în restul cazurilor se normează numai contaminarea care se supune dezactivării.

Tabelul 24

Nivelurile admisibile de contaminare radioactivă a suprafețelor de lucru, pielii, îmbrăcăminte speciale și a mijloacelor de protecție individuală

Obiectul contaminat	Nuclizii alfa activi ¹ (part./(cm ² min.))		Nuclizii beta activi (part./ (cm ² min.))
	separați ²	diverși	
Pielea intactă, lenjerii speciale, șervețele, suprafața interioară a părților anterioare ale mijloacelor de protecție individuală	2	2	200 ³
Îmbrăcăminte specială principală, suprafața interioară a mijloacelor suplimentare individuale de protecție, suprafața exterioară a încălțăminte speciale	5	20	2000

¹ **Adnotare:** pentru suprafețele de lucru ale încăperilor și utilajului contaminarea cu radionuclizi alfa activi se normează ca contaminare nefixată; pentru restul suprafețelor – contaminarea sumară (fixată și nefixată).

² **Adnotare:** nuclizii alfa activi separați sunt constituiți din nuclizi ai căror activitate medie anuală admisibilă de volum în aerul încăperilor de lucru este de <0,3 Bq/m³.

³ **Adnotare:** sunt stabilite următoarele valori ale nivelurilor admisibile de contaminare ale pielii, albiturilor speciale și ale suprafețelor interioare ale părților anterioare ale mijloacelor individuale de protecție pentru radionuclizii separați – Sr-90+ Y-90 – 40 part./(cm² min.).

Suprafețele încăperilor cu aflare permanentă a personalului și a utilajului amplasat în ele	5	20	2000
Suprafețele încăperilor cu aflare periodică a personalului și a utilajului amplasat în ele	50	200	10000
Suprafața exterioară a mijloacelor suplimentare individuale de protecție	50	200	10000

^a **Adnotare:** CII – câmpul izotrop de iradiere (4π).

^b **Adnotare:** IAP – iradierea cu fascicul paralel în geometria antero-posterioară.

^c **Adnotare:** pentru suprafețele de lucru ale încăperilor și utilajului contaminarea cu radionuclizi alfa activi se normează drept contaminare nefixată; pentru restul suprafețelor – contaminarea sumară (fixată și nefixată).

^d **Adnotare:** nuclizii alfa activi separați sunt constituiți din nuclizi ai căror activitate medie anuală admisibilă de volum în aerul încăperilor de lucru este de $<0,3 \text{ Bq/m}^3$.

^e **Adnotare:** sunt stabilite următoarele valori ale nivelurilor admisibile de contaminare a pielii, lenjeriei speciale și ale suprafețelor interioare, ale părților anterioare ale mijloacelor individuale de protecție pentru radionuclizii separați – Sr-90+ Y-90 – 40 part./($\text{cm}^2/\text{min.}$).

Partea IV.

RADIOACTIVITATEA NATURALĂ

Mediul ambiant, începând de la infinitul cosmosului până la nivelul de organizare a materiei vii de pe Terra, este străbătut de numeroase radiații cu diferite lungimi de undă. Majoritatea radiațiilor își au originea în mediul natural, din care, pentru Terra, cea mai importantă sursă este Soarele. Pentru apariția și evoluția materiei vii, se consideră că o importanță deosebită au avut radiațiile luminoase, calorice (infraroșii) și cele ionizante.

Omul trăiește într-un mediu complex, fiind continuu sub acțiunea multor agenți fizici, dintre care principalii sunt: lumina, sunetul, undele electromagnetice și radiația ionizantă.

Materia vie, inclusiv omul, a fost supusă întotdeauna expunerii la surse de radiații naturale, care, probabil, alături de alte componente ale mediului, s-au integrat procesului de evoluție. Potrivit unor afirmații, activitatea biologică normală nici nu ar putea avea loc, decât în prezența fondului natural de radiații.

Radiațiile, peste limitele naturale, sunt dăunătoare vieții.

În medie, radiația de origine naturală produce cea mai mare parte din expunerea la radiații a organismelor vii, deci și a omului. În mare măsură, radiația naturală nu poate fi evitată, sursa de radiații aflându-se în aer, apă, sol, plante și animale, în alimente, în locuință și în organismul nostru; cu toate acestea, asupra ei, se poate exercita totuși un oarecare control.

Capitolul 15.

COMPONENTELE FONDULUI RADIOACTIV NATURAL

Elementele radioactive naturale sunt semenii nașterii Universului și martorii formării sistemului Solar și a Terrei. Pe parcursul a miliarde de ani de existență a Pământului, procesul de dezintegrare a nucleelor atomilor nestabili a decurs încontinuu. Ca rezultat, s-a micșorat radioactivitatea sumară a rocilor-mamă și, deci, a solului. Unii izotopi cu perioada de viață scurtă s-au dezintegrat, iar cei cu o perioadă de viață mai lungă (de ordinul miliardelor și milioanele de ani) s-au păstrat și până acum. Elementele radioactive naturale sunt prezente în cantități neînsemnate practic în fiecare strat structural al Pământului (*fig. 88*). Energia degajată în urma dezintegrării radioactive, conform concepției actuale, este cauza încălzirii

straturilor inferioare ale Pământului, care, se presupune, că inițial au fost reci.

Radonul, exhalat din rocile ce conțin uraniu, se dizolvă în apele subterane, care pot să iasă la suprafață. Băile de Radon se utilizează pe larg în medicină în tratamentul articulațiilor, sistemului nervos periferic, bolilor ginecologice și altor maladii.

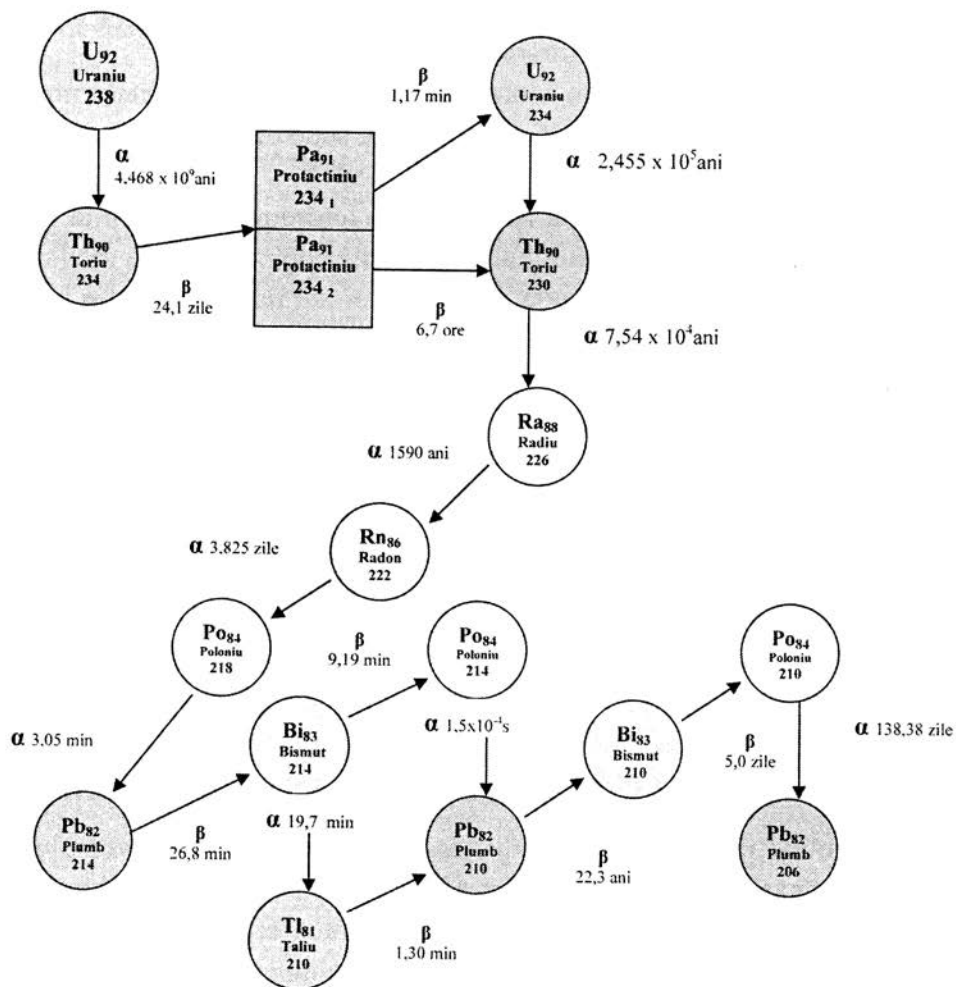


Fig. 88. Unele elemente ce au aport în formarea radioactivității naturale.

Radioactivitatea naturală, componentă a mediului ambiant, este determinată de prezența în sol, aer, apă, plante, organisme animale, precum și în organismul omului a substanțelor radioactive de origine terestră, existente în mod natural din cele mai vechi timpuri. Radiațiilor emise de aces-

te surse naturale li se adaugă și radiația cosmică extraterestră. Fiecare dintre noi este expus radiațiilor naturale, iar, în funcție de o serie de factori locali, doza este mai mare în zonele cu radioactivitate naturală crescută, în localitățile situate la altitudine mare etc.

Radioactivitatea naturală terestră prezintă, în ultimele 4-5 decenii, modificări semnificative, datorate activităților omului: aducerea la suprafață a minereurilor radioactive, extracția și utilizarea cărbunelui și a apelor geotermale, utilizarea unor îngrășăminte minerale extrase din roci fosfatice etc.

Conform Raportului Comitetului Științific al Națiunilor Unite asupra Efectelor Radiațiilor Atomice (UNICEAR) 1993, sursele naturale de expunere se împart în:

Surse aflate în afara organismului uman:

- de origine extraterestră (radiația cosmică);
- de origine terestră (radiațiile emise de radionuclizii existenți în scoarța pământului, în aer, în apă, în materiale de construcție, în plante etc.).

Surse existente în interiorul organismului, reprezentate de radionuclizii pătrunși în organism prin inhalare, ingestie și prin piele.

Fondul natural este format, după cum am mai arătat, din radiațiile cosmice și din radiațiile nucleare ale factorilor de mediu, care reprezintă un anumit conținut radioactiv natural.

15.1. Radiația cosmică

Razele cosmice au fost descoperite din întâmplare, remarcând un zgomot parazit ce afecta toate detectoarele de ionizare, zgomot produs de trecerea particulelor încărcate. Pentru a evita acest lucru este necesar de a lua măsuri de precauție pentru izolare, indicând existența unei radiații extrem de penetrantă de origine necunoscută. În 1907, Théodore Wulf a construit un nou detector ce permitea studierea acestei radiații misterioase în afara laboratoarelor. Realizând măsurători în vârful turnului Eiffel, el a constatat că fluxul de radiație era redus cu $\frac{2}{3}$ în raport cu nivelul solului, semn că fracțiunea emisă de Pământ dispăruse, fiind absorbită de atmosferă. În același timp, fluxul nu era nul, indicând că o parte din această radiație provenea din spațiu. Pentru a o confirma, Viktor Franz Hess a efectuat o serie de zboruri cu balonul la mare altitudine începând cu 1911. Pe 12 august 1912, el a atins o altitudine de 5350 metri și a demonstrat că deși fluxul misterioasei radiații continua să se diminueze până la altitudinea de 1500 metri, începea apoi să crească considerabil,

până atinge, la o altitudine de 5000 metri, o valoare de două ori mai mare decât la nivelul solului. A ajuns la concluzia că există „o sursă extraterestră de radiație penetrantă”. Această interpretare a avut nevoie de câțiva ani încă înainte de a fi acceptată de toate comunitățile științifice. În 1926, Robert Millikan, autorul primei măsurători a raportului dintre sarcina și masa electronului Millikan a măsurat sarcina electrică a electronului, raportul dintre masă și sarcina electrică fusese măsurat deja de J.J. Thomson, această măsurătoare fiind considerată descoperirea electronului în 1897), a botezat această radiație „raze cosmice”. Viktor F. Hess a împărțit Premiul Nobel pentru fizică din 1936 cu Carl Anderson, cel care descoperise cu câțiva ani înainte pozitronul, prima particulă de antimaterie (antimateria electronului). În onoarea sa, experimentul HESS îi poartă azi numele. Situat în deșertul Namibiei, acesta studiază fotonii de energie înaltă ce provin din spațiu.

Radiațiile de origine cosmică, venite din galaxia noastră (și de la Soare, mai ales în timpul erupțiilor solare) sau din afara ei, sunt relativ constante cantitativ. Radiațiile cosmice galactice reprezintă insule de particule de înaltă energie (protoni, nuclee de heliu, electroni), care bombardează Terra în permanență. Cunoaștem azi că Soarele este în mare parte responsabil de radiația observată pe Terra. În timpul momentelor de mare activitate, și mai ales de erupție solară, remarcăm o creștere a ritmului radiației pe perioade ce pot dura de la câteva ore la câteva zile sau chiar săptămâni. Particulele de origine solară au energii cinetice estimate la zeci la sute de MeV. Razele cosmice cele mai energice sunt de origine extrasolară, majoritatea posedând energii cinetice evaluate de la 100 MeV (ceea ce corespunde, pentru protoni, cu 43% din viteza luminii, adică 129.000 km/s) până la aproximativ 10 GeV (corespunzând cu 99,6% din viteza luminii). Probabil, particulele încărcate sunt accelerate de câmpuri magnetice rezultate din explozii ale „supranelor” (corpuri cerești noi) în galaxia noastră.

Radiația cosmică se împarte în primară și secundară.

1. Radiațiile cosmice primare

Radiațiile ionizante nucleare, ce se formează în spațiul cosmic, în afara granițelor terestre, alcătuite din radiații complexe cu energii ridicate și care cad în continuu asupra atmosferei terestre, poartă denumirea de radiații cosmice primare.

Radiațiile cosmice primare constau în principal dintr-un flux de particule încărcate pozitiv, în special protoni de energii înalte, care intră în sistemul solar din spațiul interstelar și dintr-un număr mai mic (în proporție de 10%) de particule alfa. În afară de acestea, în radiațiile primare se întâlnesc în proporții mult mai reduse particule grele, precum și electroni, fotoni și neutroni.

Particulele mai grele decât protonii reprezintă numai 15% din radiațiile cosmice primare, rolul lor este însă extrem de important, ele asigurând 30-35% din nucleonii ce cad asupra atmosferei, purtând 30% din întreaga energie a radiațiilor cosmice.

Energia particulelor radiațiilor cosmice primare se află în limite de câteva miliarde electron-volți până la ordinul 10^{17} - 10^{19} electroni-volți. Densitatea de flux primar este afectată de câmpul magnetic terestru, care respinge înapoi în spațiu particulele încărcate de energie mai joasă. Acest efect este dependent de latitudinea geomagnetică; astfel, densitatea de flux a protonilor de energie joasă în nivelul superior al atmosferei este mai mare la poli decât în regiunea ecuatorială.

2. Radiațiile cosmice secundare

Când particulele cosmice primare pătrund în atmosferă, având o energie mai mare, ele intră în reacții nucleare cu nucleele atomilor din aer, procese în care iau naștere protoni, pioni și kaoni și o varietate largă de produse de reacție ca: ^3T , ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , și ^{24}Na (numiți radionuclizi cosmogenici). Protonii, neutronii și pionii astfel formați reacționează, la rândul lor, în continuare cu nucleele din aer, producând noi particule secundare. Un astfel de proces este numit *casadă*. Pionii se dezintegrează în miuoni sau fotoni, inițiind alte cascade. Formarea acestor particule secundare decurge în mod continuu, deoarece o particulă primară poate crea până la 10^8 particule secundare. Radiațiile cosmice ajunse la suprafața solului constau în mare măsură din protoni, neutroni, mezoni, electroni și fotoni. Cea mai mare parte din radiațiile cosmice primare sunt absorbite în zecimea superioară a atmosferei terestre și numai o mică parte din ele ajung până la nivelul mării.

Radiațiile cosmice au o capacitate diferită de pătrundere: unele pot străbate un strat de plumb de 10 cm, acestea fiind denumite dure, iar altele au o mică capacitate de patrundere – componenta moale a radiațiilor cosmice.

15.2. Radiația terestră

Materialele din care este constituită scoarța Pământului conțin substanțe radioactive. Se consideră că energia rezultată din această radioactivitate naturală, din adâncul Pământului, contribuie la mișcările scoarței terestre.

Radiația de origine terestră este dată de radionuclizii prezenți în scoarța Pământului, fie de la formarea acestuia și sunt cunoscuți sub numele de radionuclizi primordiali, precum: potasiul-40, uraniul-238, uraniul-235, thoriul-232, fie apăruți prin dezintegrarea ultimilor trei, numiți radionuclizi secundari; timpul de înjumătățire (durata de viață) fizică, prescurtat T_f , al radionuclizilor naturali se situează între 10^7 s pentru plumb-212 și 10^{18} ani pentru bismut-209.

Potasiul-40 este cel mai important radionuclid natural, cu cca 120 de părți per milion din elementul natural stabil, adică 0,0118% din elementul potasiu și care, prin radiațiile sale beta și gama emise, este responsabil de o mare parte din doza de expunere la radiația naturală a omului.

Uraniul este dispersat în apă, în sol și în unele roci la concentrații mici. Acolo, unde atinge 1500 ppm (1,5 g/kg) într-un zăcământ, el devine economic de exploatat și folosit pentru energetica nucleară. Cei trei radionuclizi naturali, uraniul-238, uraniul-235 și thoriul-232, reprezintă capetele a trei serii radioactive naturale, cu cca 35 radionuclizi secundari (descendenți), ajungând în final, prin dezintegrări succesive, la elementele stabile: plumb-206, plumb-207 și plumb-208. Printre radionuclizii secundari cu importanță radiobiologică mare pentru organismele vii sunt: radiul-226, radiul-228, plumbul-210, poloniul-210 cu T_f mare, dar și radonul-222 și radonul-220 (fiind descendent al toriului este numit și toron), sub formă de gaze, cu T_f de numai câteva zile. Radonul-222 și radonul-220, cu descendenții lor, ajungând cu ușurință în atmosferă (și în locuințele noastre), se fixează pe particulele de praf din atmosferă, sunt inhalați de om și, datorită radiațiilor alfa emise, acționează la nivelul structurilor fine ale alveolelor pulmonare, cu efecte nedorite, evidențiate mai ales la mineri (*fig. 89*).

Radiațiile gama, emise de radionuclizii existenți în sol, în aer, în apă, în plante sau în materialele din care sunt construite locuințele, iradiază întregul organism al omului. Dozele sunt dependente, ca ordin de mărime, de geologia ținutului, de structura clădirilor, dar și de timpul de staționare a omului în locuință sau în aer liber. Suma expunerilor gama, din locuință

și din afara ei, pentru fracțiunea de timp petrecut în locuință de 80%, conduce la o doză efectivă de 420-460 μSv pe an.

Din cosmos: cca 100 000 de neutroni din radiația cosmică și 400 000 de particule din radiația secundară trec prin fiecare individ, în medie, într-o oră.

Din aerul inspirat: cca 30 000 de atomi radioactivi (radon, toron, poloniu, plumb și bismut) se dezintegrează, în fiecare oră, în plămâni dând naștere la particule alfa și beta, cât și unor radiații gama.

Din alimente: cca 15 000 000 de atomi de potasiu-40 se dezintegrează, în interiorul organismului uman, cu emisie de particule beta cu energie mare și radiații gama. Circa 7 000 de atomi de uraniu natural se dezintegrează, într-o oră, în organismul nostru cu emisie de radiații alfa, beta și gama.

Din sol și din materialele locuinței noastre: peste 200 000 000 de radiații gama trec prin fiecare dintre noi într-o oră.

În prezent, materialele de construcție sunt analizate de specialiștii în igiena radiațiilor, fiind interzise de către Ministerul Sănătății cele cu radioactivitate naturală crescută. Există totuși construcții în mediul rural, mai ales în apropierea zonelor de exploatare uraniferă, cu conținut radioactiv natural crescut, care conduce la mărirea dozei de expunere la radiații naturale. Se estimează că doza efectivă anuală datorată radonului și descendenților săi este în medie de 1300 μSv (în mediul urban – 1200 μSv , iar în mediul rural – 1400 μSv). Fluctuațiile mari, cu unul-două ordine de mărime, se datoresc unor condiții locale, legate de materialele de construcție sau de zonele cu fond natural de radiații crescut. Doza de expunere poate fi redusă prin controlul conținutului radioactiv, mai ales în Ra-226 și Ra-224 – precursorii radonului și toronului, cât și prin etanșarea foarte bună a dușumelei, care reduce pătrunderea gazelor radioactive din sol, în cazul locuințelor din mediul rural. Dacă la aceste măsuri se adaugă și o bună aerisire a încăperilor, o ventilație ideală cu purificarea aerului,

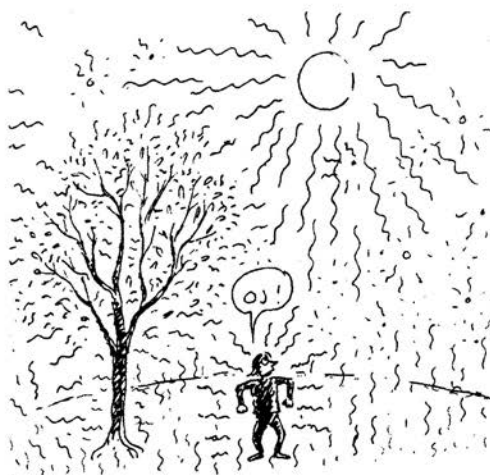


Fig. 89. Radiații naturale.

atunci doza de expunere la radon și descendenții săi poate fi redusă sub 800 μSv pe an.

Radioactivitatea naturală a aerului, apei, alimentelor și omului. În toate componentele mediului, inclusiv în om, sunt prezenți radionuclizi naturali precum: potasiul-40, descendenții uraniului și thoriului (radiu-226, radiu-228, radiu-224, plumb-210, poloniu-210, pentru a aminti pe cei cu radiotoxicitate foarte mare), alături de carbon-14 și hidrogen-3 – radionuclizi cosmogeni. Conținutul în potasiu-40, comparativ cu cel al altor radionuclizi naturali, este de departe cel mai ridicat, în sol (cca 500 Bq/kg), în apă (0,15 Bq/l), în plante (100-500 Bq/kg) și în alimente (40-180 Bq/kg). Ca valoare a conținutului radioactiv, dar cu unul-trei ordine de mărime mai mică, potasiul-40 este urmat de radiu-226, carbon-14 și hidrogen-3 în apă, sol sau în vegetație. În aer, radonul-222 și radonul-220 sunt cei mai frecvenți radionuclizi naturali.

Se estimează că doza efectivă anuală dată de radionuclizii, care pătrund în organismul uman odată cu alimentele, se ridică la 230 μSv , din care potasiul-40 contribuie cu 170 μSv . Pentru a controla ca doza efectivă dată de radionuclizii naturali din organismul uman să se situeze sub cea amintită mai sus, toate produsele alimentare și apa potabilă sunt analizate în vederea scoaterii din consum a celor cu conținut radioactiv natural crescut.

Doza efectivă totală datorată radiațiilor de origine naturală este, în medie, de 2270 μSv pe an. Se estimează că această doză poate să crească chiar dublu de la o localitate la alta, în timp ce diferențele individuale pot fi cu peste un ordin de mărime mai mari. După UNSCEAR (6), doza efectivă anuală pentru toată populația Terrei este estimată la 2400 μSv , din care fracțiunea de 1100 μSv este dată de radiația cosmică și radiația terestră, iar 1300 μSv se datorează radonului și descendenților săi.

În unele țări de pe glob, precum India, Brazilia, Congo, Suedia, nivelul de expunere la radiația naturală este de cca 10 ori mai ridicat, comparativ cu media pe Terra.

Diverse activități actuale ale omului pot determina local modificarea concentrației unor radionuclizi naturali și, ca urmare, pot conduce la creșterea expunerii populației prin acești radionuclizi. Unele dintre aceste activități constau în aducerea din profunzime la suprafața solului a unor materiale (roci), având un conținut radioactiv natural peste media concentrațiilor existente la suprafață, precum: mineritul radioactiv, exploata-

rile petrolifere și geotermale. Alte activități, prin procesul tehnologic, pot produce concentrarea substanțelor radioactive naturale în produse, sub-produse sau deșeuri, cum ar fi: industria îngrășămintelor chimice din roci fosfatice, arderea cărbunelui în centrale termoelectrice etc.

Populația limitrofa obiectivului industrial, care prelucrează sau lucrează cu astfel de materiale, primește o doză de expunere suplimentară considerată încă redusă, comparativ cu doza naturală. În schimb, personalul care lucrează în aceste locuri, mai ales minerii și nu numai cei din minieritul uranifer, trebuie să fie în atenția celor care asigură normele de protecție, având în vedere concentrațiile mult mai ridicate în radionuclizi naturali (mai ales radon-222 și radon-220 cu descendenții lor, liberi sau fixați pe particule fine de praf) la locul de muncă, care duc la apariția unor afecțiuni ale plămânilor (fibroză pulmonară) și chiar ale sistemului osos (osteoporoză). De aici apare necesitatea controlului medical periodic al personalului expus profesional din obiectivele industriale respective, cu luarea tuturor măsurilor necesare de asigurare și respectare a normelor de protecție.

15.3. Radioactivitatea aerului atmosferic

Aerul cu care respirăm reprezintă un amestec de gaze, ce alcătuiesc atmosfera, adică învelișul gazos care înconjoară globul pământesc. Aerul include părți componente ale atmosferei, cât și cantități variabile de diverse amestecuri de origine naturală, și poluanți produși prin activitatea antropogenă.

Aerul atmosferic reprezintă un amestec fizic, și nu un compus chimic de gaze, datorită cărui fapt, în cazul unui conținut procentual practic constant de părți componente ale aerului la diferite înălțimi, în urma modificării densității atmosferei, se schimbă concentrațiile și presiunea lor parțială. Aerul este sursa principală de oxigen, este necesar organismului pentru procesele de oxidare și de menținere a vieții.

Puritatea și componența relativ stabilă a atmosferei se datoresc unor forțe puternice de autopurificare: vântului care transportă impuritățile aducând în locul aerului viciat aer curat; precipitațiilor atmosferice; acțiunii chimice a oxigenului și ozonului, care oxidează substanțele organice și alte impurități din aer; plantelor, ce absorb bioxidul de carbon, îmbogățind aerul cu oxigen; radiației ultraviolete a soarelui, datorită căreia vaporii de apă din straturile superioare ale atmosferei se descompun cu eliminare de oxigen.

Deoarece organismul se află în strâns contact cu aerul atmosferic, asupra lui acționează nu numai compușii chimici ai aerului, dar și factorii meteorologici, ce caracterizează starea fizică a atmosferei: temperatura, umiditatea și mișcarea aerului, presiunea atmosferică, radiația solară care străbate atmosfera, radioactivitatea etc.

Radioactivitatea naturală a aerului este generată de descendenții de viață scurtă ai radioizotopilor Rn-ului (radonul și toronul) și de radionuclizii proveniți din interacțiunea radiației cosmice cu atmosfera. Există măsurări sistematice ale concentrațiilor acestor radionuclizi în atmosfera liberă. Variațiile diurne și pe anotimpuri ale concentrațiilor măsurate au fost amplu comentate în publicațiile de specialitate. De asemenea, au fost puse în evidență corelații ale valorilor măsurate cu fenomenele meteorologice: vânt, presiune, temperatură, precipitații, ceață etc.

Concentrațiile medii și dispersiile valorilor măsurate în atmosfera liberă sunt prezentate în *tabelul 25*.

Tabelul 25

Concentrațiile descendenților de viață scurtă ai radonului și toronului în atmosfera liberă (Bq/m³)

Radionuclid	Minimă	Maximă	Medie
Descendenții radonului	0,8	11,9	5,0
Descendenții toronului	0,001	0,5	0,25

Concentrația medie a descendenților radonului (considerând o concentrație echivalentă de echilibru) pentru întreg Pământul este estimată de UNSCEAR la 4 Bq/m³, iar cea a descendenților toronului – la 0,2 Bq/m³. Descendenții de viață scurtă ai radonului și toronului sunt radionuclizi care se atașează la particulele de praf din atmosferă și pătrund în plămân, ducând la iradierea internă prin inhalare.

Valoarea medie a dozei în exterior, de 0,18 mSv, este mai mare decât cea estimată de UNSCEAR pentru toată Terra (0,1 mSv). Omul modern își petrece cea mai mare parte a timpului în încăperi (între 60 și 80 % din timp). Datorită prezenței în sol și în materialele de construcție a radionuclizilor din seriile naturale, radonul și toronul dispersează prin podele și prin ziduri, pătrunzând în interiorul încăperilor. Prin lipsa unei ventilări corespunzătoare aerul din încăperi are, de regulă, concentrații ale acestor radionuclizi mult mai mari decât cel din exterior. Concentrația medie a ra-

donului, în interior, la noi în țară a fost apreciată la 30 Bq/m^3 . S-a estimat un EDE anual intern datorat acesteia de $1,02 \text{ mSv}$. Însumând iradierea internă datorată descendenților radonului și toronului, în interiorul locuinței și în afara acesteia, rezultă un EDE total egal cu $1,2 \text{ mSv}$ pe an. În mediul rural valoarea estimată prin măsurări ale concentrațiilor descendenților este de $1,4 \text{ mSv}$ pe an (*Anexele 1 și 2*).

15.4. Radioactivitatea naturală a solului

Poluarea radioactivă a solului se realizează în special prin căderi atmosferice (precipitații) sau prin intermediul apelor. Gradul de poluare depinde în mod esențial de natura geologică a solului dat, de porozitatea și permeabilitatea rocilor componente, precum și de prezența unei rețele hidrografice. Și în acest caz, pe lângă circulația, repartiția și dispersia radioelementelor în sol, se produce o concentrare biologică prin acumularea lor în țesuturile trofice. O serie de studii efectuate în Marea Britanie arătând că acestea se concentrează de 21 de ori mai mult în plantele furajere decât în sol și de 714 de ori mai mult în carnea de oaie.

În sol se găsesc radionuclizi aparținând, în principal, seriilor radioactive naturale ale U-238, U-235, Th-232, precum și K-40.

Radionuclizii naturali sunt răspândiți în toate tipurile de roci și de soluri, precum și în apele de suprafață și subterane. Răspândirea lor nu este uniformă, existând zone de pe Terra cu concentrații mai mari, precum și anumite tipuri de roci în care U și Th se găsesc mai abundent. Aceste zone sunt restrânse la perimetrele în care au loc exploatări și explorări miniere uranifere și la teritoriile limitrofe. Datorită numărului redus al populației care trăiește în aceste zone, influența concentrațiilor mai ridicate de U și Th, asupra EDE colectiv, la nivelul întregii populații, este redusă.

Seria U-235 este compusă din 14 radionuclizi principali. Radionuclizii cu radiotoxicitatea cea mai mare sunt Ra-226 și produsele de dezintegrare de viață scurtă ale Rn-222. Datorită perturbărilor pe care le suferă solul de la suprafață, precum și datorită difuziei gazului nobil Rn prin sol, cei 14 radionuclizi ai acestei serii nu sunt în echilibru radioactiv, în sol. Totuși, pentru estimările expunerii externe a populației la radiațiile provenite din sol este suficientă ipoteza echilibrului radioactiv între componenții seriilor naturale.

Seria U-235 are concentrații mult mai mici datorită abundenței naturale reduse a acestui radionuclid ($0,7 \%$ față de $99,3\%$ din abunden-

ța radionuclidului U-238). Componentii acestei serii nu au o contribuție semnificativă la doza colectivă a populației țării noastre.

Seria Th-232 este compusă din 11 radionuclizi. Mai importanți sunt cei doi izotopi ai Ra (224 și 228) și descendenții de viață scurtă ai Rn-220 (cunoscut sub numele de toron). Din același motiv ca și în cazul descendenților seriei U-238 pentru scopul propus în acest subcapitol este suficientă ipoteza echilibrului lor.

În *tabelul 26* sunt prezentate concentrațiile medii ale Ra-226 (component al seriei U-238), ale Ac-228 (din seria Th-232) și ale K-40.

Tabelul 26

Concentrația radionuclizilor naturali în sol (Bq/kg)

Radionuclid	Minim	Maxim	Medie
Ra-226	10	90	38
Ac-228	13	65	39
K-40	330	800	540

Valorile medii pentru Pământ raportate în UNSCEAR sunt: K-40 cu 370 Bq/kg, radionuclizii din seria U-238 cu 25 Bq/kg, radionuclizii din seria Th-232 cu 25 Bq/kg.

Cu ajutorul acestor valori s-a estimat iradierea externă gama datorată radionuclizilor din sol, ținând seama de faptul că omul se află în afara locuinței numai 20% din timpul vieții. Valoarea maximă rezultată este de 0,10 mSv pe an.

Din sol, radionuclizii ajung în apele de suprafață și în apele subterane, precum și în plante, pătrunzând în lanțurile trofice și apoi în om.

Petrecându-și o bună parte din timp în încăperi, omul este supus unei doze de iradiere externă datorată pereților, tavanului și dușumelelor încăperilor, deoarece în materialele de construcție se găsesc concentrații variabile de radionuclizi naturali. Aceștia pot influența doza totală primită de populație pe două căi: prin iradierea directă și prin emisia radioizotopilor radon și toron. Tipurile de materiale permise a se folosi pentru construirea locuințelor, altele decât cele tradiționale, trebuie să fie avizate, din punctul de vedere al radioactivității, de organele abilitate ale Ministerului Sănătății. Doza medie datorată iradierii externe din locuințe a fost estima-

tă la 52 nGy/h, căreia îi corespunde un EDE anual de 0,36 mSv, pentru un timp efectiv petrecut în locuință de 80% (factor de ocupanță de 0,8). Suma iradierilor externe gama, cea din locuință și cea din afara ei conduce la un EDE de 0,46 mSv pe an.

15.5. Radioactivitatea naturală a apei

Apa pură este o combinație chimică bine definită între oxigen și hidrogen, care, la presiunea de 760 mm col. Hg și temperatura $T > 0^{\circ}\text{C}$ (4°C), se prezintă ca un lichid incolor, transparent, fără gust și miros; în strat gros, apa este ușor colorată în albastru.

Cu toate că peste $\frac{2}{3}$ din suprafața globului pământesc este acoperită cu apă, ca urmare a creșterii populației (rata mondială de 19%) și a intensificării formelor de consum, se estimează o dublare a consumului de apă dulce în mai puțin de 35 de ani.

Radioactivitatea este dată de conținutul apei în substanțe radioactive (tritiu, stronțiu, cesiu, uraniu, radon etc.) și are la bază proprietatea acestora de a emite radiații spontane cunoscute sub numele de radiații *alfa*, *beta* și *gama*. Concentrația radiațiilor, măsurate cu aparate speciale, se exprimă în Bq/dm³ sau Bq/l. În țara noastră, radioactivitatea apelor subterane este inferioară concentrației maxime admise, considerată a fi de 40 Bq/dm³.

Din punctul de vedere al dozei de iradiere externă, radioactivitatea naturală a apei este de importanță redusă. Aceasta afectează doza totală primită de un individ în timpul îmbăierii sau prin folosirea apei menajere. Mult mai importantă este doza primită prin folosirea apei pentru băut și pentru prepararea hranei.

Concentrația radionuclizilor naturali în apele de suprafață este prezentată în *tabelul 27*.

Tabelul 27

Concentrația radionuclizilor naturali în apa de suprafață (Bq/l)

Radionuclid	Minimă	Maximă	Medie
Ra-226	0,0020	0,020	0,009
Ac-228	0,0015	0,018	0,008
K-40	0,0250	0,240	0,135

Nu există estimări medii pentru apele de pe întreg Pământul, dar valorile de mai sus se înscriu în limitele de variație ale concentrațiilor raportate în alte țări.

Circuitul apei în natură

Globul pământesc conține cantități enorme de apă în învelișurile lui externe. Atmosfera constituie unul dintre învelișurile planetei noastre, în care apa există în cantități apreciabile. În rocile de pe glob apa se găsește până la acea adâncime, la care, din cauza temperaturii, trece sub formă de vapori. În litosferă apa se poate găsi sub formă lichidă, solidă sau gazoasă, atât liberă cât și legată de anumite structuri cristaline.

Ca și suprafața scoarței terestre, apa din atmosferă apare sub toate cele trei stări de agregare care o caracterizează:

- stare gazoasă, sub formă de vapori, condiționând umiditatea aerului și fiind prezentă chiar și în aerul foarte uscat;
- stare lichidă, sub formă de picături foarte fine (în cazul ceței și al norilor) sau mai mari (în cazul burniței și ploilor);
- stare solidă, sub formă de ace fine de gheață și fulgi de zăpadă, în norii de la marile înălțimi sau în straturile reci de aer, ca și sub formă de grindină de diferite dimensiuni (bobițe fine de mazărice sau bulgări de mărimea unui ou de găscă).

Litosfera primară, oceanele și mările sunt depozitele cele mai mari de apă. Atmosfera, suprafața continentelor și freaticul lor sunt cele mai sărace depozite de apă. Cu toate acestea, deși apa continentală este în cantitate relativ redusă, ea are cea mai mare putere de circulație, revenind în circuit de nenumărate ori față de apa din litosferă sau din mări și oceane.

Deci, și importanța ei în dinamica hidrică este cea mai mare.

Circuitul apei în natură este influențat de o serie de factori care condiționează anumite procese fizice și chimice din atmosferă, determinând umiditatea atmosferică și chiar climatul regiunii respective (*fig. 90*).

Acești factori care alcătuiesc baza circuitului apei în natură sunt evaporarea, condensarea și precipitațiile. Astfel, prin același circuit, împreună cu apa circulă și radionuclizii dizolvați în ea.

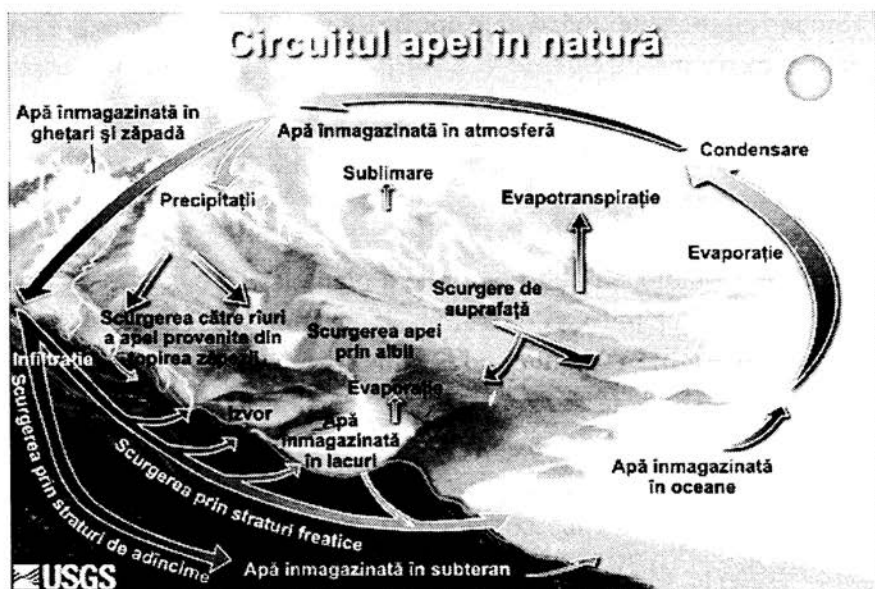


Fig. 90. Circuitul apei în natură.

Radioactivitatea apelor de suprafață și a celor subterane în dependență de adâncime

Migrația substanțelor radioactive din roci și sol la suprafață se face în principal prin apele suoterane. Radioactivitatea acestor ape este dată mai ales de prezența Ra-226, Rn-222, U-238. Importanța igienică cea mai mare o are Ra-226. Concentrația maximă admisibilă de Ra-226 în sursele subterane, ca de altfel și în bazinele de suprafață, din care se alimentează diferite colectivități, este de 5×10^{-12} g/l, iar U-238(natural) – de 5×10^{-5} g/l. Conținutul de Rn-222 nu se normează, deoarece prin contactul apei cu aerul atmosferic el se volatilizează.

Cercetările efectuate în Republica Moldova în diferite teritorii nu au evidențiat surse de apă potabilă ce depășesc limitele admisibile.

Apele cu un conținut de Ra-226 peste 1×10^{-11} g/l, U-238 peste 3×10^{-5} g/l și Rn-222 peste 20Bq/l fac parte din grupa apelor radioactive și unele din ele se utilizează în scop terapeutic. În scop potabil nu se recomandă utilizarea surselor de apă ce depășesc limitele admisibile.

Radioactivitatea naturală a râurilor și a lacurilor este dată mai ales de prezența Ra-226, a cărui concentrație în medie este de $2,5 \times 10^{-13}$ – $4,2 \times 10^{-12}$ g/l. Conținutul de U-238 crește paralel cu conținutul global de săruri din apă. Rn-222 în apele de suprafață, de obicei, lipsește.

Radioactivitatea apei mării este conferită mai ales de prezența K-40, a cărei concentrație medie este de 1-2 Bq/l. Printre alte elemente întâlnim: Ra-226 în jur de 1×10^{-13} g/l, U-238 până la 2×10^{-6} g/l, Th-232 până la 5×10^{-9} g/l.

15.6. Radioactivitatea naturală a vegetației

Determinarea radioactivității naturale a plantelor se face în scopul folosirii acestor valori ca parametri de intrare în modelele de estimare a dozei de ingerare. Concentrațiile radionuclizilor naturali din vegetația spontană sunt sistematizate în *tabelele 28 și 29*.

Tabelul 28

Concentrația radionuclizilor naturali în vegetația spontană (Bq/kg)

Radionuclid	minimă	maximă	medie
Ra-226	1,8	3,7	2,5
Ac-228	1,6	3,5	2,2
K-40	350	640	505

Tabelul 29

Concentrația radionuclizilor naturali în grâul boabe (Bq/kg)

Radionuclid	Minimă	Maximă	Medie
Ra-226	0,2	0,8	0,5
Ac-228	0,2	0,8	0,5
K-40	75	150	112

Nu există estimări medii pentru întreg Pământul, dar valorile de mai sus se înscriu în limitele de variație ale concentrațiilor raportate în alte țări.

15.7. Radioactivitatea naturală a alimentelor

Din sol elementele radioactive, ca și cele neradioactive, trec în apă, iar împreună cu soluțiile apoase trec în plante, ceea ce face ca atât în apă, cât și în plante să se găsească Ra-226, U-238, Th-232, produsele lor de dezintegrare, K-40 și o serie de alte elemente radioactive naturale din sol. În concentrații relativ mici se mai găsesc și C-14, H-3, Be-7, și alte substanțe care se formează în aer sub acțiunea neutronilor radiațiilor cosmice și care din aer trec apoi în apă și plante și de aici în organismul animalelor sau direct la om.

În plante sunt prezenți izotopi alfa activi, cum ar fi: Ra-226, U-238 și produsele lor de dezintegrare, iar în concentrații mai mici – Th-232 și produsele lui de dezintegrare. Printre izotopii beta-activi se găsește mai ales K-40.

Conținutul de Ra-226 în produsele alimentare de natură vegetală și animală oscilează în limite de $3,74 \times 10^{-2}$ – $3,74 \times 10^{-1}$ Bq/kg, iar în lapte – între 9×10^{-2} – $11,2 \times 10^{-3}$ Bq/kg. Conținutul de K-40 din produsele alimentare se estimează la 10^{-2} – $4,0$ Bq/kg.

În organismul omului pătrunde zilnic în medie 75 Bq K-40, iar Ra-226 – în cantități de $1,5 \times 10^{-1}$ Bq/zi.

Radioactivitatea naturală a țesuturilor vegetale și animale este determinată în principal de prezența K-40, în parte – de cea a Ra-226 și într-o măsură mai mică de prezența C-14 și a substanțelor radioactive. Determinările efectuate în principalele componente ale dietei, precum și în meniurile din zonele cu fond radioactiv moderat sunt prezentate în *tabelul 30*.

Tabelul 30

Concentrația radionuclizilor naturali în unele alimente (BqA sau Bq/kg) și meniuri (Bq/zi)

Aliment	Radionuclid								
	Ra- ²²⁶			Pb- ²¹⁰			K- ⁴⁰		
	minim	maxim	mediu	minim	maxim	mediu	minim	maxim	mediu
Apă (rețea)	0,0007	0,004	0,002	0,007	0,044	0,011	0,13	0,17	0,15
Lapte	0,0009	0,012	0,008	0,011	0,015	0,013	28,8	53,3	40,7
Produse lactate	0,007	0,044	0,012			0,038	10	46	18,5
Carne	0,002	0,0030	0,011	0,015	0,019	0,017	71	123	92,6
Produse de panificație	0,03	0,13	0,09	0,049	0,059	0,053	13	76	37
Legume	0,014	0,19	0,02	0,019	0,044	0,021	143	523	182
Meniuri	0,014	0,051	0,023	0,018	0,043	0,029	40,2	88,7	53,2

Aceste valori sunt folosite pentru estimarea ingestiei anuale a radionuclizilor naturali din alimente.

Ingestia anuală medie de U-238 este de cca 5 Bq, de Ra-226 – de cca 15 Bq, de Th-232 – de cca 2 Bq și de Ra-226 – de cca 15 Bq.

Valorile determinate ale ingestiei anuale de radionuclizi naturali sunt indicate în Raportul UNSCEAR-93. Se constată contribuția mare la EDE, prin ingestie, mai ales a Pb-210, Po-210, Ra-226 și Ra-228, iar, prin inhalare – a Pb-210 și Po-210. Doza de iradiere datorată altor radionuclizi naturali, cei cosmogeni, este mult mai redusă; excepție face C-14, cu o încorporare de cca 20 000 Bq/an, căreia îi corespunde un EDE de 12 μ Sv pe an.

15.8. Radioactivitatea corpului uman

Schimbul permanent de substanțe dintre organismul uman și mediu face ca radionuclizii naturali prezenți în unele produse alimentare, apă și aer să fie decelați și în om, ca urmare a inhalării și ingestiei.

Radionuclizii naturali pot fi determinați direct – prin măsurarea lor în țesuturi sau în tot corpul și indirect – prin evaluarea în funcție de conținutul lor în alimente sau aer. Estimarea directă a radionuclizilor din organismul uman se poate face cu acuratețe numai pentru emițătorii gama, cu ajutorul instalațiilor de măsurare numite antropogametre; limita de detecție destul de ridicată și conținutul radioactiv intern relativ redus permit măsurarea cu foarte mare dificultate a radionuclizilor naturali. De aceea, în numeroase studii, realizate mai ales pentru radionuclizii alfa și beta emițători, s-a efectuat măsurarea conținutului radioactiv în țesuturi post-mortem. Evaluarea încărcării umane cu radionuclizi, pentru o perioadă de timp, datorată ingerării și inhalării unor radionuclizi, se face și cu ajutorul coeficienților de retenție, existenți în literatura de specialitate, dacă se cunoaște conținutul radionuclizilor respectivi în produsele consumate și în aer.

Potasiul este sub control homeostatic, deși sunt multe boli care afectează nivelul său din organism. Concentrația de K-40 în organismul uman este mult mai mare față de cea existentă în factorii de mediu (aer, apă, sol), atingând cca 55 Bq/kg. La un factor de doză de $3 \mu\text{Sv} \times \text{an}^{-1} / \text{Bq} \times \text{kg}^{-1}$ se estimează că EDE anual pentru adulți ajunge la 165 μ Sv.

Dintre ceilalți radionuclizi naturali, se acordă importanță deosebită Ra-226, care are un conținut situat între 1,5 și 15 Bq/întreg organismul, U-natural cu cca 0,1 Bq/kg în organele interne, și Th-natural cu valori ceva mai mici. Cât

privește Rn-222 și Rn-220, dizolvați în sânge, limfă și în țesutul adipos, ei prezintă un conținut de 2-3 Bq/întreg organismul.

Pentru conținutul radionuclizilor naturali existenți în organismul uman, EDE total este 0,23 mSv, ceea ce reprezintă cca 10% din EDE total dat de radioactivitatea naturală, fără a ține seama de aportul zilnic la iradiere al radonului, toronului și descendenților (*tabelul 31*).

Tabelul 31

EDE anual din surse naturale la populația adultă (mSv)

Sursa de expunere	EDE în general	EDE în zone cu fond ridicat
Radiații cosmice	0,39	2,0
Radiația gama terestră	0,46	4,3
Radionuclizi din organism (exceptând radonul)	0,23	0,6
Radonul și descendenții săi	1,3	10,0
Total (rotunjit)	2,4	diferite EDE

Capitolul 16.

RADIAȚIILE IONIZANTE NATURALE CA FACTOR HABITUAL, MECANISMELE DE ACȚIUNE, EFECTELE NOCIVE ȘI MĂSURILE DE PROFILAXIE

Activitatea vitală a tuturor sistemelor organizate biologic și în special a omului se desfășoară într-un univers supus acțiunii unei multiple și variate game de radiații, de la cele sesizabile direct cu simțurile noastre, până la cele sesizabile doar prin intermediul unei aparaturi, uneori foarte complicate.

Mediul ambiant conține surse naturale de radiații existente de miliarde de ani pe Pământ, încă de la formarea acestuia, însoțind apariția și evoluția viețuitoarelor, inclusiv a omului. Prin activitatea sa economică și socială de-a lungul timpului, omul a modificat și modifică sursele naturale de radiații, creând astfel o radioactivitate naturală suplimentară.

O altă denumire – „penetrantă” – caracterizează capacitatea radiațiilor ionizante de energii mari (mai întâi de toate cuantele gama și Roentgen) de a pătrunde în profunzimea substanței sau în corpul organismelor vii. Pe această proprietate se bazează multitudinea de metode de diagnostic radiologic – metode de neînlocuit în diagnosticul multor maladii.

Într-o măsură și mai mare această particularitate se manifestă prin acțiunea radiațiilor de energii și mai mari, cuantele sau particulele cărora „transportă” energia cu mult mai mult în raport cu radiația ultravioletă. Efectul biologic al radiațiilor de energii mari este considerabil în raport cu cantitatea foarte mică de energie pe care ele le transportă. Este cunoscut că doza mortală a radiațiilor gama sau Roentgen, în caz dacă s-ar transforma în energie termică, nu ar fi de ajuns nici pentru fierberea unui pahar cu apă. Totodată, corpul uman poate suporta fără nicio consecință semnificativă pentru sănătate influența iradierii cu radiații ale spectrului vizibil sau infraroșu apropiat în cantități energetice de exprimare cu mult mai mari.

Acest paradox radiobiologic se explică prin faptul că fiecare cuantă sau particulă de energii mari, în parte, în timpul interacțiunii cu țesuturile vii generează în ele schimbări calitative noi, mai profunde, de alt tip, în raport cu numeroase cuante de radiații optice. Un rol de bază în acest tip de interacțiune joacă prima etapă – cea fizică, care duce la efectul de ionizare. Ionii formați în urma acestui efect posedă o activitate chimică sporită și generează o verigă întregă de evenimente și schimbări, al căror rezultat final poate fi constatat și observat liber: boala actinică sau chiar moartea organismului, mutații sau malformațiuni.

Este necesar de menționat încă o latură importantă a radiațiilor ionizante: lipsa oricăror senzații sau incapacitatea de a fi recunoscute prin intermediul organelor de simț ale omului. Spre deosebire de razele optice sau undele radio, care produc în anumite doze efecte de încălzire a țesuturilor expuse, radiația ionizantă, chiar și în doze mortale, nu este percepută. Totuși, careva efecte secundare, rezultate în urma acțiunii razelor ionizante, pot fi percepute de organisme vii. Spre exemplu, șobolanii sau unele primatelor sunt capabile să constate momentul începutului acțiunii radiațiilor ionizante prin apariția aerului ionizat și a ozonului. Mirosul ozonului poate servi drept indicator al iradierii ionizante. Sunt cunoscute și unele fapte, când astronauții constată apariția unor efecte de explozii luminoase pe retina ochiului închis, generate de particule cosmice grele ce provoacă ionizarea pigmentilor vizuali.

În general, însă, acțiunea radiațiilor ionizante este nepercepută, din considerente că nu există receptori specifici care le-ar percepe. Ca explicație poate fi faptul că pentru organismele vii diapazonul undelor cu energii mari, în condițiile Pământului, nu este informativ.

Dintr-o parte, astfel de radiații pe Terra sunt omniprezente. Ele vin din univers (raze cosmice) permanent, cu o intensitate relativ constantă în de-

curs de milioane de ani. Sunt generate de elemente radioactive naturale, din compoziția rocilor-mamă, aerului, solului, apei și din corpul organismelor vii, existente odată cu formarea Pământului ca corp ceresc. Ca rezultat, orice organism viu este adaptat la condițiile vieții în prezența fondului radioactiv natural, care poate varia din intensitate de la o zonă spre alta. Însă în ultimii 110 ani omul a descoperit fenomenul radioactivității și a creat surse de radiații ionizante, care depășesc ca intensitate de mii de ori fondul radioactiv natural, a creat arma nucleară și termonucleară, ce prezintă un real pericol pentru întreaga omenire și viața pe Pământ.

Utilizarea energiei nucleare și termonucleare în scopuri pașnice este una dintre căile de rezolvare a problemei energetice, cu care omenirea începe să se confrunte deja la etapa prezentă. Însă direcționarea cercetărilor nucleare de pe făgașul pașnic spre cel de înarmare poate conduce doar spre un singur final – distrugerea vieții din sistemul Solar!

Dozele de radiații, care pot produce apariția unui minim de mutații într-o generație de indivizi, într-un ecosistem, dacă sunt menținute în permanență, pot conduce la adevărate catastrofe ecologice în generațiile următoare.

Efectul nociv al radiațiilor asupra materiei vii este datorat proprietății de a ioniza mediul prin care trec, ionizarea fiind modul dominant de pierdere a energiei de către radiații când traversează mediul material. Materia vie este caracterizată prin existența unor molecule deosebit de mari, ale căror proprietăți și funcționalitate biochimică pot fi ireversibil perturbate. Astfel, un act de ionizare, de trecere a unui electron pe un alt nivel în acest ansamblu sau de smulgere a lui provoacă mari schimbări în caracteristicile moleculei respective, schimbări care acumulate la nivelul celulei se pot traduce prin grave dereglări ale metabolismului, culminând cu moartea celulei sau cu erori de structură și funcționare a aparatului genetic celular, de tip cancerigen ori mutagen.

Sunt cazuri când unele elemente radioactive pot fi integrate de oameni prin apa de băut sau prin alimente ori inhalate odată cu aerul. Elementul radioactiv poate intra în circuitul metabolic și în aceste cazuri însăși sursa radioactivă se află în organism, unica măsură posibilă de protecție, fiind folosirea de substanțe care elimină și insolubilizează elementul respectiv. Poate apărea situația când un element radioactiv, fiind sub limita admisă pentru întregul organism, într-un anumit organ are o concentrație ridicată. Pentru a exclude astfel de cazuri, normele de protecție admit concentrația limită a acestor substanțe în apă și aer.

În tabelul 32 prezentăm expunerea medie a omului la radiații nucleare, pentru a putea fi calculată doza naturală.

Tabelul 32

Expunerea medie anuală de la diferite surse

Cauza	Detaliu	Echivalent de doză	Explicație
I. Punctul geografic	Nivelul mării (se adaugă la fiecare 150 m în plus în altitudine)	0,28 mSv/an	Radiații cosmice
Zona	Calcaroasă Sedimentară Granitică	0,50 mSv/an 0,30 mSv/an 0,12 mSv/an	Radiații terestre
Casă din:	Lemn Cărămidă Granit	0,01 mSv/an 0,20 mSv/an 0,20 mSv/an	Radiațiile materialelor
II. Alimentația	Carne, legume	0,20 mSv/an	Radiațiile alimentelor Ca-14, K-40
III. Modul de viață	O călătorie cu avionul Televizorul Examenul radiologic	0,04 mSv/an 0,03 mSv/an 0,35 mSv/an	Radiații cosmice

Demult se știe că doze mari de radiații ionizante, mult mai mari decât radiațiile de fundal, pot cauza cancer și leucemie peste mai mulți ani de la expunere. Datorită experimentelor pe plante și animale, se presupune că radiațiile ionizante pot provoca mutații genetice care afectează generațiile descendente. Nivelurile foarte mari de radiații pot provoca stări de disconfort și moartea.

Nivelul efectelor cauzate de radiații depinde de mai mulți factori: doză, frecvența dozării, tipul radiației, organul expus, vârsta și sănătatea. De exemplu, embrionul uman este deosebit de sensibil la radiații.

Organismul uman are mecanisme de apărare împotriva daunelor aduse de radiații, la fel și împotriva altor factori cancerigeni.

Partea a V.
RADIOACTIVITATEA ARTIFICIALĂ

Capitolul 17.

SURSELE ARTIFICIALE DE RADIAȚII IONIZANTE

Radioactivitatea artificială este determinată de prezența în mediul ambiant a unor radionuclizi care își datorează existența activității omului. Cunoașterea de către om a fenomenelor legate de radioactivitate a început încă la sfârșitul secolului trecut, dar cucerirea și, deci, stăpânirea imenselor forțe din structura atomului a fost realizată abia în ajunul celui de-al Doilea Război Mondial. Evident, cele mai importante activități umane care au dus la contaminarea mediului ambiant cu substanțe radioactive artificiale sunt, în ordinea amplitudinii efectelor, exploziile nucleare în atmosferă și energetica nucleară. În afara acestora, de fapt, toate aplicațiile fenomenelor nucleare în scopuri practice conduc, conștient sau accidental, la răspândirea unor substanțe radioactive în mediu.

17.1. Principalele surse de poluare radioactivă:

a) Utilizarea practică în industrie, medicină, cercetare a diferitor surse de radiații nucleare, care, ca materiale radioactive, se pot răspândi necontrolate în mediu.

b) Exploatări miniere radioactive, la extragere, prelucrare primară, transport și depozitare, pot contamina aerul, prin gaze și aerosoli, precum și apa, prin procesul de spălare.

c) Metalurgia uraniului sau a altor metale radioactive și fabricarea combustibilului nuclear, care prin prelucrări mecanice, fizice, chimice poate cuprinde în cadrul procesului tehnologic și produse reziduale gazoase, lichide sau solide, stocarea, transportul, eventual evacuarea lor, pot determina contaminarea mediului.

d) Instalațiile de rafinare și de retratare a combustibilului nuclear.

e) Reactorii nucleari experimentali sau de cercetare, în care se pot produce industrial noi materiale radioactive.

f) Centralele nucleare-electrice care poluează mai puțin în cursul exploatării lor corecte, dar mult mai accentuat în cazul unui accident nuclear.

g) Exploziile nucleare experimentale, efectuate îndeosebi în aer sau în apă și subteran, pot contamina vecinătatea poligonului cât și întreg globul pământesc, prin depunerea prafului și aerosolilor radioactivi, generați de ciuperca exploziei.

h) Accidentele în transportul aerian, maritim, feroviar sau rutier a celor mai diverse materiale radioactive.

Trebuie subliniat, că în mod normal, impactul tuturor acestor activități este mic față de radioactivitatea naturală. Totuși, în situații de accident sau în cazul bombardamentelor atomice, efectele pe zone mai mult sau mai puțin restrânse sunt dramatice. Efectuarea numeroaselor teste, peste 1000, mai ales în perioada anilor 1945-1963, cu diverse tipuri de arme nucleare în aer, în apă sau în subteran, a condus la contaminarea Pământului cu cantități uriașe de radionuclizi. Testele cele mai contaminante la nivel zonal sau chiar planetar au fost cele realizate pe suprafața solului (în aer). Era exploziilor a fost inaugurată în 1945, în deșertul Alamogordo (New Mexico), fiind urmată, la scurt timp, de detonarea celor două arme nucleare, de la Hiroșima și Nagasaki, din Japonia, pe 6 și respectiv 9 august 1945. Cele două explozii nucleare au făcut sute de mii de victime umane – efectele lor nu au dispărut în totalitate nici în zilele noastre, alături de distrugerii materiale incalculabile.

Explozia unei arme nucleare eliberează în natură o gama largă de produse de fisiune și de activare, precum și material nefisionat (uraniu-235 sau plutoniu-239), care sunt transportate în straturile înalte ale atmosferei, ceea ce face ca această radioactivitate artificială să fie răspândită în toată lumea. De aici radionuclizii fixați pe particule de praf, în funcție de dimensiuni, revin pe pământ la diferite perioade de timp după explozie, sub formă de căderi sau depuneri de ploii radioactive, numite și fall-out radioactiv.

Datorită numeroaselor *teste nucleare*, evaluările din 1964 arătau că emisfera nordică prezenta o contaminare radioactivă de 3 ori mai ridicată față de cea sudică, iar inventarul conținutului de strontiu-90 din stratosferă se ridică la uriașa activitate de $5 \cdot 10^{17}$ Bq. În aceeași situație se află și cesiul-137, în timp ce pe sol s-au depus cca 3 tone de plutoniu-239. Radioactivitatea depunerilor atmosferice a scăzut treptat după 1963 (odată cu semnarea Tratatului de interdicere a experiențelor cu arme nucleare.

Posibil, cel mai controversat aspect al expunerii la radiații este legat de energetica nucleară. Riscul pentru sănătate în cazul funcționării tehnologice normale a unor astfel de unități este minor. Expunerea totală datorată tuturor accidentelor grave, care au avut loc până în prezent, inclusiv accidentul de la Cernobîl, echivalează cu doar 20 de zile de expunere la fondul natural după cum menționează raportul UNSCEAR, 1993.

Alături de radiatiile nucleare cele mai cunoscute (alfa, beta și gama), emise în timpul dezintegrării radioactive, mai există *radiațiile X (Roentgen)*, precum și electronii sau neutronii, care iau naștere în aparate generatoare de radiații pre-

cum: aparatul Roentgen, acceleratorul de particule, ciclotronul, betatronul, dar numai pe timpul funcționării instalației respective. Radiațiile obținute din aceste instalații sunt utilizate în medicină, mai ales, pentru diagnostic și tratament.

Cele mai importante activități umane care au dus la contaminarea mediului ambiant cu substanțe radioactive artificiale sunt exploziile nucleare în atmosferă și energetica nucleară. Descoperirea fisiunii nucleare, în anul 1939, a dus destul de rapid la implicații și consecințe nemaiîntâlnite pentru omenire și anume: arma nucleară, motorul pentru propulsie și mai apoi centrala nucleară electrică. În urma fisionării (scindării) unui atom greu de uraniu, produsă de un neutron, rezultă energie, peste 250 de radionuclizi de fisiune și de activare, precum și neutroni de fisiune care, prin interacțiune cu alți atomi de uraniu, produc noi fenomene de fisiune, ceea ce poate conduce la autoîntreținerea reacției. Radionuclizii rezultați constituie o puternică sursă radioactivă, care se produce atât în urma exploziei nucleare, cât și în reactorul utilizat pentru propulsie sau pentru obținerea curentului electric; la acestea se adaugă uzina de tratare a combustibilului nuclear uzat.

Radionuclizii artificiali posibili de a ajunge în mediul ambiant sunt în ultima instanță rezultatul unuia din cele două procese nucleare importante în aplicații: fisiunea și fuziunea nucleară.

Fisiunea nucleară este procesul prin care un nucleu se rupe (spontan sau nu) în două (sau mai multe) fragmente. Din procesul de fisiune nucleară rezultă diferiți radionuclizi. Ei pot apărea direct (produse de fisiune) sub forma fragmentelor respective sau pot fi rezultatul ciocnirii inelastice a neutronilor cu nucleeele combustibilului ori al altor materiale prezente în reactor (produse de activare). La iradierea suplimentară se consideră folosirea fisiunii nucleare de către om, mai întâi sub forma exploziilor nucleare din atmosferă, apoi sub forma fisiunii nucleare controlate din reactorul nuclear.

Fuziunea nucleară este procesul invers fisiunii, când mai multe nuclee se unesc, formând un nucleu mai mare. Ca și în cazul fisiunii și prin fuziune se degajă energie, procesul fiind de mare interes, cu atât mai mult în prezent, când problema energiei este atât de actuală. Acest proces are loc cu nuclee ușoare, pentru care este exoenergetic. Asemenea procese au loc în Soare (atomi de H și Deuteriu se unesc formând Helium). Procesul este greu de produs datorită respingerii electrostatice dintre nuclee.

Radiațiile din surse artificiale sunt utilizate în diverse ramuri ale economiei: în controlul unor procese industriale și al calității produselor, în scop de diagnostic și tratament medical uman și veterinar, în cercetări din biologie, medicină, agricultură etc., în sterilizarea unor produse farmaceutice și în conservarea unor produse alimentare, etc.

Radiația de origine artificială este pe larg folosită în industrie, în primul rând în controlul proceselor și al calității produselor, în scopuri diagnostice în stomatologie și în medicina veterinară, și, în sfârșit, ca mijloc important de studiu în colegii, universități și altele. În consecință, există un număr considerabil de mare de persoane expuse la radiație ionizantă în procesul muncii lor, în plus față de cele din medicină sau din industria energetică nucleară. Multe persoane sunt expuse la radiații ionizante provenind de la o serie de surse artificiale sau de la sursele în condiții artificiale. Între aceste surse se includ ceasurile luminate cu substanțe radioactive, receptoarele de televiziune și călătoriile cu avionul care constituie un avantaj al vieții moderne.

17.2. Caracteristica tipurilor de surse utilizate în Republica Moldova

În Republica Moldova sursele radioactive sunt folosite în următoarele domenii:

în medicină – pentru radiodiagnostic și radiologia intervențională, procedeele radioterapeutice și investigațiile de medicină nucleară;

în agricultură și în cercetările științifice – pentru iradierea plantelor, produselor cerealiere, studierea variabilității genetice;

în industria poligrafică – pentru neutralizarea câmpurilor electrostatice, în industria alimentară și a materialelor de construcție – pentru măsurarea nivelelor materiei prime.

Sursele de radiații ionizante cu activitate înaltă sunt amplasate în cadrul următoarelor categorii de obiecte:

- instituții medicale, secții de radioterapie, unde se exploatează instalații de gama-terapie în scopul tratamentului tumorilor la pacienți. Sursele utilizate în instalații sunt amplasate în încăperi închise, dotate cu sisteme de semnalizare automată în funcțiune și bariere staționare de protecție;
- obiective pentru stocarea și condiționarea surselor și a deșeurilor radioactive, unde sursele gama de capacitate înaltă și deșeurile radioactive sunt păstrate în condiții adecvate, este asigurată securitatea surselor și sistemul de semnalizare. Pentru fiecare lot de deșeurii radioactive sunt perfectate pașapoartele de predare la stocare. Personalul este instruit în domeniul radioprotecției;
- laboratoare științifice, unde instalațiile de capacitate înaltă sunt folosite pentru cercetările științifice în scopul iradierii culturilor agricole și obținerea soiurilor înalt productive.

17.3. Registrul Național de Notificare și Evidență a Surselor de radiații ionizante

„Registrul național al surselor de radiații ionizante și al persoanelor fizice și persoanelor juridice autorizate” este gestionat de către Autoritatea națională de reglementare din domeniul radioprotecției și securității nucleare. Registrul reprezintă Sistemul unic de stat de evidență și control al surselor de radiații ionizante și al materialelor nucleare și este instituit în scopul înregistrării de stat, supravegherii amplasamentului și circulației acestora, analizei cantitative și calitative în vederea planificării acumulării, deservirii, prevenirii accidentelor cu radiații ionizante, utilizării lor neautorizate.

În scopul asigurării completării și actualizării veridice a Registrului, persoanele juridice și fizice sunt obligate să ducă evidența surselor de radiații ionizante și a materialelor nucleare, precum și să efectueze inventarierea periodică a acestora. „Registrul Național de Notificare și Evidență a Surselor de Radiații Ionizante” cuprinde sursele de radiații ionizante și materialele nucleare legal notificate.

În general, în activitățile radiologice se utilizează surse radioactive închise (Co-60, Cs-137, Ra-226, Ir-92 etc.), cu excepția medicinei nucleare, unde se utilizează surse radioactive deschise, în special izotopi cu o perioadă de viață scurtă: I-131 (sub formă de Hipurat I-131), I-125 (generatoare de Tc-99m). Surse deschise de Cs-137; Sr-90; H-3; C-14; S-35 și P-32 se utilizează în știință și în medicină. O mare parte din generatoarele Roentgen sunt utilizate în medicină (circa 92%), restul fiind utilizate în industrie (în defectoscopia non-distructivă), în știință (*fig. 91*).

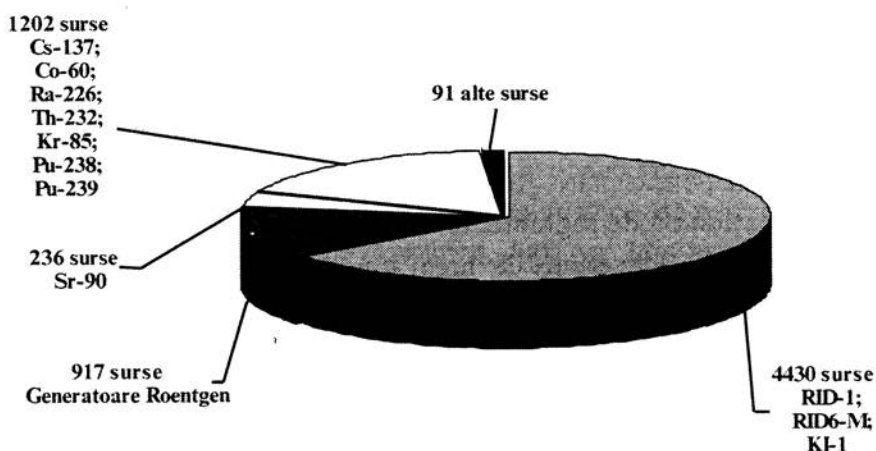


Fig. 91. Sursele de radiații ionizante aflate la evidență în Republica Moldova.

Procesul de evidență a surselor de radiații ionizante se efectuează în conformitate cu legislația în vigoare și se bazează pe informația prezentată de agentul economic.

Accesul la informația din Registrul este permis în conformitate cu prevederile legislației în vigoare. Persoanele juridice și fizice au obligații de a prezenta date veridice despre prezența, amplasarea, cantitatea, circulația, exportul, importul, casarea, depozitarea temporară sau definitivă a surselor de radiații ionizante și a materialelor nucleare.

Inventarierea surselor se efectuează pe întreg teritoriul Republicii Moldova la persoanele fizice sau juridice care utilizează în activitățile desfășurate sursele de radiații ionizante și materiale nucleare.

17.4. Principiile de eliberare a autorizațiilor pentru genul de activitate

Principiile de bază ale autorizării sunt:

- a) asigurarea egalității în drepturi și a intereselor legitime ale tuturor întreprinderilor, organizațiilor și persoanelor fizice;
- b) transparența actelor necesare inițierii și/sau desfășurării activității;
- c) stabilirea unui mod unic de autorizare pe teritoriul Republicii Moldova;
- d) transparența decizională în domeniul autorizării;
- e) previzibilitatea procesului de autorizare;
- f) reglementarea condițiilor și procedurilor de autorizare prin acte legislative și normative;
- g) echitabilitatea (proportionalitatea) dintre interesele societății și drepturile întreprinzătorilor la efectuarea controlului asupra respectării condițiilor de autorizare, precum și la suspendarea/retragerea autorizațiilor.

Autorizării sunt supuse toate activitățile nucleare și radiologice care nu întrunesc condițiile de exceptare. Autorizarea se realizează prin eliberarea de la Autoritatea națională de reglementare din domeniul radioprotecției și securității nucleare a adeverinței de înregistrare și a avizului.

Adeverința de înregistrare reprezintă actul prin care persoanele juridice și fizice sunt autorizate să desfășoare activități nucleare și radiologice cu surse radioactive, precum și cu orice tip de generatoare de radiații ionizante. Adeverința de înregistrare poate fi eliberată numai pentru activitățile nucleare și radiologice persoanelor fizice și juridice, care dețin certificatul de securitate pentru instalațiile radiologice și avizul sanitar, al cărui valabilitate este de cel

puțin șase luni. Adeverința de înregistrare se eliberează în mod gratuit și este valabilă pe întreg teritoriul Republicii Moldova.

Avizul Autorității naționale de reglementare din domeniul radioprotecției și securității nucleare este eliberat în scopul obținerii licenței de activitate și constituie parte din sistemul de licențiere.

Certificatul de securitate se solicită pentru fiecare tip distinct de material radioactiv, de instalație radiologică, de dispozitiv generator de radiații ionizante, de material sau echipament utilizat în scopul protecției împotriva radiațiilor ionizante, de mijloc de containerizare sau de transport special amenajat în acest scop, pe care solicitantul autorizației intenționează să-l producă, exporte sau importe, în vederea utilizării sau comercializării. Certificatul de securitate se eliberează în baza evaluării documentației tehnice și condițiilor de utilizare a instalațiilor radiologice și nucleare.

17.5. Setul de documente necesare pentru exploatarea surselor de radiații ionizante

Dosarul pentru solicitarea adeverinței de înregistrare sau avizului se depune și conține următoarele:

- a) copia certificatului de înregistrare la Camera Înregistrării de Stat;
- b) documentația tehnică pentru încăpere, instalații radiologice;
- c) copii ale autorizațiilor sanitare de funcționare și avizelor;
- d) certificatul de securitate;
- e) permisul de exercitare;
- f) alte informații considerate necesare, în funcție de genul de activitate radiologică sau nucleară.

Solicitarea avizului sau a adeverinței de înregistrare se efectuează cu cincisprezece zile lucrătoare înainte de inițierea activității sau de la data dobândirii produsului supus autorizării, prin depunerea cererilor respective.

Documentația tehnică, parte a dosarului, necesară pentru obținerea certificatului de securitate trebuie să conțină, după caz, informații suficiente despre:

- a) certificatul de conformitate pentru produs sau despre un alt document ce atestă conformitatea produsului, eliberat de un organism notificat și publicat în Jurnalul Oficial al Comunității Europene;
- b) programul de testare și rezultatul acestuia;
- d) sistemul de asigurare a calității (manualul calității);
- e) scopul pentru care a fost conceput;
- f) instalare, montare, întreținere;

- g) operare/utilizare;
- h) etichetare, marcare;
- i) perioada de garanție, durata de viață a instalației, perioada pentru care se asigură piese de schimb de către producător;
- j) deservire, reparare;
- k) documentația însoțitoare;
- l) modalitatea de dezafectare sau de dispunere ca deșeu;
- m) pericolul de iradiere;
- n) alte pericole pe care le poate genera.

Documentația tehnică, parte a dosarului, necesară pentru obținerea autorizației parțiale, sub formă de aviz de import-export, trebuie să conțină toate informațiile relevante pentru a demonstra respectarea prevederilor reglementărilor specifice aplicabile și a permite evaluarea gradului de utilizare a securității radiologice și a protecției fizice a materialelor radioactive sau nucleare.

17.6. Autorizarea și avizarea sanitară a activităților cu surse de radiații ionizante

Autorizare sanitară – procedură de evaluare oficială a produselor, serviciilor și activităților cu sursele de iradiere ionizantă din punctul de vedere al acțiunii lor asupra sănătății expușilor profesionali, pacienților și a populației.

Aviz sanitar – act eliberat, în condițiile legii, de către autoritatea competentă de sănătate publică, prin care se confirmă dacă activitățile cu sursele de iradiere ionizantă, procesele, serviciile sau produsele corespund ori nu cerințelor sanitare ale actelor normative.

Activitățile cu surse de radiații ionizante necesită eliberarea autorizației sanitare de funcționare și a avizului sanitar de către Serviciul de Supraveghere de Stat a Sănătății Publice al Ministerului Sănătății în baza notificării intenției de utilizare a acestora. Autorizația sanitară de funcționare și avizul sanitar se efectuează în baza solicitării depuse de persoane juridice sau fizice interesate, precum și a expertizei dosarelor, produselor, serviciilor și/sau activităților cu respectarea restricțiilor și a prevederilor legislației în vigoare. Plasarea pe piață a produselor și a serviciilor suspuse autorizării sanitare, conform legislației sanitare aplicabile, dar neautorizate sanitar, este interzisă. Produsele și serviciile sunt supuse următoarelor forme de autorizare sanitară: notificarea, avizarea sanitară, înregistrarea și certificarea sanitară.

Persoanele fizice și juridice sunt obligate să admită în activitățile cu sursele de radiații ionizante numai personalul, care posedă un permis de exer-

citare a funcției, eliberat în baza unei evaluări de către instituțiile abilitate competente.

Autorizația sanitară de funcționare și avizul sanitar se eliberează numai în cazul dacă solicitantul:

- a) îndeplinește condițiile prevăzute de legislația în vigoare;
- b) este în măsură să demonstreze calificarea profesională a personalului instituției în cauză;
- c) este convins că personalul nominalizat cunoaște cerințele de radio-protecție, inclusiv și în cazuri de urgențe radiologice sau accidente (incidente).

Titularul de autorizația sanitară de funcționare este responsabil de a întreprinde toate măsurile necesare pentru îndeplinirea planurilor de intervenție în cazuri de urgențe radiologice sau de suprairadiere a pacienților și personalului, și este obligat să suporte prejudiciile provocate sănătății fiecărei persoane ori pacient.

Înregistrării de stat sunt supuse produsele și serviciile care prezintă pericol potențial pentru sănătatea și viața omului: substanțele chimice, radioactive, biologice și preparatele din ele, utilizate pentru prima dată în țară.

17.7. Modalitățile de stocare temporară a surselor

La încetarea activității, titularul de autorizație este obligat:

- a) să conceapă și să pună în practică un plan de dezafectare autorizat, după caz;
- b) să transfere sursele de radiații ionizante la utilizatori autorizați, în temeiul unei autorizații de transfer, sau să le trateze ca deșeuri radioactive, în temeiul autorizației respective;
- c) să transfere deșeurile radioactive la o stație de tratare și stocare temporară sau depozitare definitivă;
- d) să decontamineze spațiile și utilajele pe care le-a utilizat, după caz, până la limita de exceptare.

Încetarea activității devine efectivă numai după înregistrarea scrisorii de notificare a acestui fapt, însoțită de documentele doveditoare că zona de lucru, în care au fost utilizate surse radioactive deschise sau cu pericol de contaminare, a fost controlată de reprezentantul ANRANR sau de oricare expert acreditat.

Capitolul 18.

SUPRAVEGHEREA SANITARĂ PREVENTIVĂ A OBIECTIVELOR RADIOLOGICE ȘI NUCLEARE

Supravegherea sanitaro-epidemiologică preventivă include un șir de măsuri specializate efectuate la diferite etape (în ordinea consecutivității lor):

- autorizarea sanitară a instituțiilor de proiectare și a obiectivelor nucleare și radiologice cu eliberarea autorizațiilor sanitare de funcționare. Autorizația sanitară se eliberează pe un termen de 5 ani;
- evaluarea și atribuirea terenurilor pentru construcție sau reconstrucție cu eliberarea avizului igienic privind selectarea terenului ;
- eliberarea sarcinilor de proiect;
- expertiza igienico-radiologică a proiectelor cu eliberarea avizului igienic la proiecte;
- autorizarea tehnologiilor noi cu eliberarea avizului igienic ;
- luarea în evidență cu întocmirea fișelor și registrelor și efectuarea supravegherii sanitare și a controlului obiectivelor pe toată durata construcției sau a reconstrucțiilor;
- recepția preliminară și finală a obiectivelor nucleare și radiologice construite sau reconstruite cu întocmirea procesului-verbal.

Dirijarea și organizarea supravegherii sanitare preventive în conformitate cu „Regulamentul privind supravegherea sanitară de stat” stabilește un sistem unic de dirijare și organizare a supravegherii sanitare preventive. Procedura autorizării sanitare se efectuează conform legislației în vigoare.

La atribuirea terenurilor pentru amplasarea obiectivelor, solicitantul trebuie să prezinte: decizia primăriei privind atribuirea terenului pentru construcție sau titlul de proprietate asupra terenului, certificatul de urbanism, planul general, schema planului de situație și încadrare în teritoriu, studiul barierelor staționare de protecție, sistemul de ventilare aflux-reflux. La unele obiective se prezintă datele privind posibilitatea alimentării cu apă potabilă a obiectivului cu indicarea sursei de apă și a modului de evacuare în sistemul de canalizare sau de deversare a apelor reziduale în caz de construcție a sistemului propriu de epurare; în urma examinării pe teren, cu întocmirea unui proces-verbal, se eliberează avizul igienic, prin care se coordonează sau nu se coordonează atribuirea terenului, spațiului pentru construcție sau reconstrucție. Acest aviz este valabil pe toată perioada de proiectare a obiectivelor și nu trebuie să depășească termenele de referință ale planului general pentru acest

teritoriu; în caz de schimbare a destinației obiectivului în perioada de construcție, avizul își pierde valabilitatea, fiind necesară reexaminarea posibilității amplasării în acest teritoriu a altui obiectiv.

Sarcina sanitară se consideră ca temei pentru elaborarea proiectelor, îndeplinirea măsurilor prevăzute în documentele nominalizate și respectarea regulamentelor igienice.

La etapa de recepție prealabilă a obiectivului este necesar de a efectua controlul barierelor staționare de protecție, sistemului de ventilare aflux-reflux, dotării cu mijloace staționare și individuale de radioprotecție, efectuării testelor de acceptanță a utilajului, aparatajului radiologic. La această etapă este necesar de a efectua măsurătorile dozimetrice ale nivelelor iradierilor ionizante, calității aerului în încăperile închise, tipului și calității materialelor folosite la finisarea lucrărilor de construcție, inclusiv a emisiilor de la materialele sintetice utilizate pentru finisarea lucrărilor de construcție. La această etapă se pregătește procesul-verbal de constatare cu includerea tuturor documentelor, inclusiv a proceselor-verbale a lucrărilor efectuate, a rezultatelor măsurătorilor dozimetrice, parametrii privind microclima la darea în exploatare a obiectivelor radiologice și nucleare trebuie să corespundă cerințelor igienice în vigoare.

Cerințele prevăzute la recepția finală. Obiectivul este primit în exploatare dacă au fost îndeplinite toate măsurile prevăzute în proiect. Obiectivul este recepționat în exploatare de către comisie numai la prezentarea avizului igienic pozitiv semnat de medicul-șef sanitar de stat al teritoriului administrativ, unde s-a efectuat construcția obiectivului.

Controlul sanitar preventiv în domeniul igienei radiațiilor include alegerea terenului pentru construcție, expertiza sanitară a proiectelor, supravegherea procesului de construire, participarea la recepționarea în exploatare a obiectivelor radiologice și nucleare, expertiza sanitară a materialelor de construcție utilizate în calitate de bariere staționare de protecție.

În scopul evitării cazurilor de recepționare în exploatare a obiectivelor radiologice și nucleare cu încălcarea cerințelor igienice, medicii sunt obligați să efectueze controlul sanitar asupra procesului de construire, asupra corespunderii obiectivelor construite proiectului. În cazurile necesare medicul igienist, prin intermediul medicului-șef sanitar de stat, abordează problema despre stoparea construcției, completând „Hotărârea despre interzicerea, oprirea...” sau despre luarea altor măsuri administrative.

Capitolul 19.

SUPRAVEGHEREA SANITARĂ CURENTĂ A OBIECTIVELOR RADIOLOGICE ȘI NUCLEARE

Sarcinile medicului igienist în domeniul controlului sanitar curent constau în controlul periodic al obiectivelor radiologice și nucleare cu luarea în considerare a gradului de risc potențial asupra sănătății personalului, populației și a mediului de trai. Se efectuează controlul asupra respectării cerințelor de radioprotecție la exploatarea surselor de iradiere ionizantă, controlul asupra eficienței sistemului de ventilație, barierelor staționare de radioprotecție, controlul asupra efectuării și înregistrării dozelor de iradiere a persoanelor expuse profesional la radiații ionizante și a dozelor permise de pacienți. Controlul se efectuează conform unui plan de lucru sau în urma adresării persoanelor fizice și juridice.

Supravegherea sanitară curentă a obiectivelor radiologice și nucleare trebuie să cuprindă controlul următoarelor aspecte:

1. Efectuarea examenelor medicale a persoanelor expuse profesional la radiații ionizante și a dozelor permise de pacienți.
2. Efectuarea măsurărilor dozimetrice generale și a controlului dozimetric individual cu înregistrarea dozelor.
3. Corespunderea barierelor staționare de radioprotecție.
4. Prezența proceselor-verbale ale efectuării testelor de control al calității și a criteriilor testelor de acceptanță.
5. Prezența programului de asigurare a calității în secția, unitatea radiologică.
6. Prezența instrucțiunilor de radioprotecție, securitate nucleară și protecție a muncii la locurile de lucru ale personalului.
7. Analiza sarcinii negative la examinarea pacienților, justificării examenelor de radiodiagnostic.
8. Prezența responsabilului de radioprotecție în instituție.

Supravegherea stării radioprotecției mai poate include și unele aspecte specifice în funcție de profilul obiectivului radiologic sau nuclear luat în parte.

Capitolul 20.

UTILIZAREA RADIAȚIILOR IONIZANTE – BENEFICII ȘI DEZAVANTAJE

Cunoscând radiațiile, le putem utiliza și controla în deplină siguranță în beneficiul omenirii. Rareori efectele benefice ale radiațiilor atrag atenția marelui public. Și aceasta în pofida utilizării pe scară tot mai largă, cu mult succes a radiațiilor în tratamente medicale, diagnosticări, în cercetare, precum și în îmbunătățirea calității produselor în diverse activități industriale.

Energia nucleară prezintă numeroase avantaje. Este economică: o tona de U-235 produce mai multă energie decât 12 milioane de barili de petrol. Ea este curată în timpul folosirii și nu poluează atmosfera. Din păcate, există și câteva dezavantaje. Centralele nucleare sunt foarte scumpe. Produc deșeuri radioactive care trebuie să fie depozitate sute de ani înainte de a deveni inofensive. Un accident nuclear, ca cel produs în 1986 la Centrala nucleară de la Cernobâl, în Ucraina, poate polua zone întinse și produce îmbolnăvirea sau chiar moartea a multor persoane.

Construirea reactorilor nucleari și posibilitatea de a utiliza aceste instalații pentru a produce energie electrică în cantitate mare au transferat apoi problema cercetării radiațiilor, iar odată cu aceasta și problema protecției contra radiațiilor, într-un domeniu industrial și economic.

Creșterea neconținută a numărului de reactori nucleari și a puterii acestora necesită aplicarea unor măsuri de securitate pentru a evita eventualele accidente și consecințele lor, ca de exemplu cel de la Windscale, Anglia în octombrie 1957, când au fost eliminate în mod accidental în atmosferă importante substanțe radioactive, care au produs contaminarea solului, a producției agricole și a apei potabile din întreaga regiune.

Cercetările se îndreaptă către descoperirea de noi surse inepuizabile de energie. Unele dintre ele sunt deja utilizate.

Energia eoliană (a vântului) a fost folosită de sute de ani la propulsia corăbiilor și la acționarea morilor de vânt. Turbinele eoliene moderne au fost construite să poată genera electricitate. Doar în California (SUA) se găsesc 15000 de asemenea turbine. Oamenii de știință din SUA au calculat că întreaga cantitate de energie ar putea fi generată de vânt. Energia solară este dată de căldura Soarelui. Captatoarele solare sub forma unor panouri pot acoperi necesarul energetic al unei case. Celulele de combustie, realizate din siliciu, sunt utilizate pentru producerea energiei în spațiul cosmic.

Începând cu anul 1950, radiația a fost utilizată din ce în ce mai mult în diagnosticări și tratamente medicale, întrucât este ușor de detectat radiația emisă de radioizotopi (materiale radioactive). Anual au loc milioane de teste medicale, utilizând tehnica medicinei nucleare prin care se afirmă sau se confirmă diagnostice: se localizează și se descriu tumori, adeseori eliminând necesitatea intervenției chirurgicale. De asemenea, cu ajutorul radiațiilor emise de radioizotopi se tratează în prezent cancerul. Radiațiile distrug celulele canceroase și previn multiplicarea lor. Acest tratament este numit „radioterapie”. Radiațiile sunt utilizate în tratarea a cel puțin 50% din cazurile de cancer. În fiecare an, jumătate de milion de oameni din mai mult de 80 de țări sunt tratați de cancer utilizând această metodă.

Radiațiile mai sunt utilizate în domeniul medical și farmaceutic la: sterilizarea instrumentelor chirurgicale, dezinfectarea bandajelor, a mănușilor, seringilor și la prepararea unor produse farmaceutice.

Capitolul 21.

UTILIZAREA RADIAȚIILOR NUCLEARE ÎN MEDICINĂ

Radiația ionizantă și substanțele radioactive sunt folosite în mod curent în medicină: în imagistica medicală pentru examinarea interiorului corpului uman (raze X, camere cu pozitroni, scanarea cu scintilație, contoarele de corp uman etc.), pentru iradierea anumitor părți ale corpului în scopul reducerii tumorilor canceroase (radioterapie) și pentru diagnosticarea disfuncțiilor biologice folosind trăsori radioactivi care urmăresc traseul în corp și destinația anumitor substanțe, cum sunt hormonii sau iodul.

Iradierea medicală reprezintă cea mai importantă sursă de iradiere artificială pentru populație. Ea provine din examenele radiologice (radioscopii și radiografii), din radioterapie și din utilizarea izotopilor radioactivi în scop diagnostic și terapeutic.

Medicina utilizează de mai bine de un secol radiația. Posibilitatea vizualizării scheletului a constituit o revoluție în medicină, iar folosirea razelor X s-a extins rapid până în punctul când toate clinicile medicale și spitalele au azi departamente de radiologie. Instalațiile de radiații X, alături de sursele închise de radium-226, sunt printre primele surse de radiații utilizate de om în medicină, pentru diagnostic și tratament.

În prezent, radiațiile ionizante sunt folosite într-o mare varietate de proceduri de diagnostic, de la simple radiografii ale toracelui sau studii dinamice pentru diverse organe interne, până la tratarea cancerului. Radiațiile date de

sursele artificiale închise, precum sursa de cobalt-60, de sursele artificiale deschise și de generatoarele de radiații, utilizate în medicină, constituie domeniul de activitate numit „medicina radiațiilor”.

Domeniile folosirii radiațiilor din surse artificiale în medicină sunt:

- utilizarea radiațiilor X în scop diagnostic: radioscopia clasică, radiografia medicală, radiofotografia, radiografia dentară, radioscopia cu amplificator de imagine etc.
- radioterapia externă și internă: roentgenterapia, cobaltoterapia, cesiuterapia, brahiterapia și terapia cu radiații care au energie mare (neutroni, electroni, ioni grei), date de accelerator, betatron, ciclotron etc.;
- medicina nucleară, unde se utilizează, mai ales, radionuclizi de viață scurtă pentru investigații interne cu tehnetiu-99 m sau în scop terapeutic cu iod-131.

Sursa artificială majoră de expunere a populației Republicii Moldova o constituie utilizarea în scopuri medicale a radiațiilor ionizante. O contribuție semnificativă în expunerea populației constituie utilizarea radiațiilor ionizante în scop diagnostic și terapeutic.

În scopul îmbunătățirii sistemului de radioprotecție și securitate radiologică a personalului medical și reducerii dozei de iradiere a pacienților, provenite de la surse de radiații ionizante, o atenție deosebită se acordă estimării dozelor de iradiere, administrate în cadrul investigațiilor și procedurilor radiologice.

21.1. Utilizarea radiațiilor ionizante în radiodiagnosticul medical și radiologia intervențională

Razele X în scop diagnostic sunt folosite în radioscopia clasică, radiografia medicală, radiofotografia, radiografia dentară, radioscopia cu amplificator de imagine, radiologia intervențională etc. Anual în instituțiile medico-sanitare publice și private sunt efectuate un număr impunător de investigații de radiodiagnostic cu expunerea la radiații ionizante a personalului medical și a pacienților. Instalațiile de radiații X sunt printre primele surse de radiații utilizate de om în medicină, pentru diagnostic și tratament.

Marea contribuție, pe care o are radiodiagnosticul în stabilirea diagnosticului, a indicațiilor terapeutice și a prognosticului, a făcut ca în toate țările să se observe o creștere a numărului de examene radiologice. Trebuie de avut în vedere, însă, faptul că orice examinare radiologică este însoțită de o creștere a expunerii la radiații ionizante, implicând un risc potențial pentru cel exami-

nat. În cursul examenelor de radiodiagnostic, cantitatea de radiații primită în cursul unei radiografii este sensibil mai mică decât cea primită în cursul radioscopiilor. Nivelul de iradiere depinde, de asemenea, de energia utilizată, precum și de durata examinării și de dimensiunile câmpului expus.

Radioprotecția și securitatea radiologică a pacienților și a personalului, care activează în domeniul radiodiagnosticului medical, este asigurată prin respectarea cerințelor referitoare la amplasarea, utilizarea și organizarea activității în secțiile și cabinetele de radiodiagnostic (exploatarea instalațiilor radiologice, utilizarea filmelor radiografice, reactivilor, ecranelor, casetelor și a mijloacelor individuale de radioprotecție), la asigurarea și la controlul calității.

În cadrul expunerilor medicale, investigațiile din radiodiagnostic constituie principalul contribuabil la doza colectivă anuală. S-a constatat, că radiografiile și radioscopiile cutiei toracice, radiografia intestinului și a regiunii lombare a coloanei vertebrale pot fi considerate examenele cu cel mai sporit grad de iradiere a individului. Echivalentul dozei efectiv *per capita* în a. 2005 în Republica Moldova a constituit $0,44 \pm 0,12$ mSv.

Instalațiile de radiodiagnostic sunt aparate radiologice care includ generatorul, tubul radiogen, utilajul pentru alimentare electrică, sistemul de reglare a regimului de lucru al tubului radiogen, receptorul de imagine și stativele (fig. 92, fig. 93).

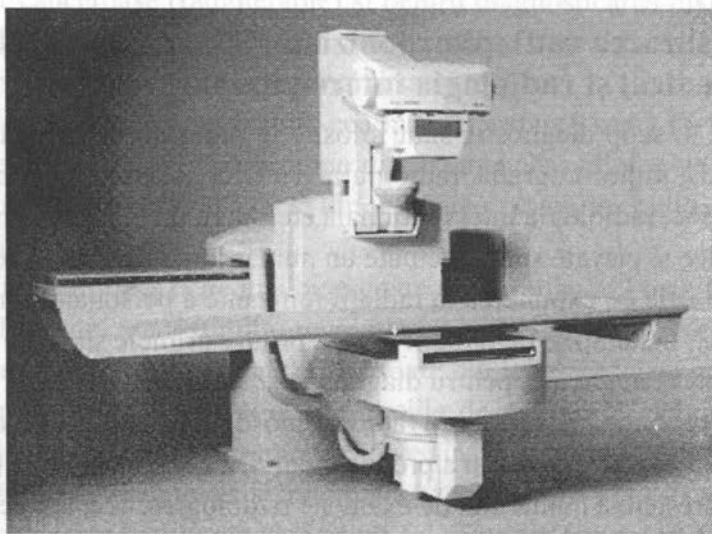


Fig. 92. Sistem multifuncțional pentru examinările generale cu radiații X și urgente.

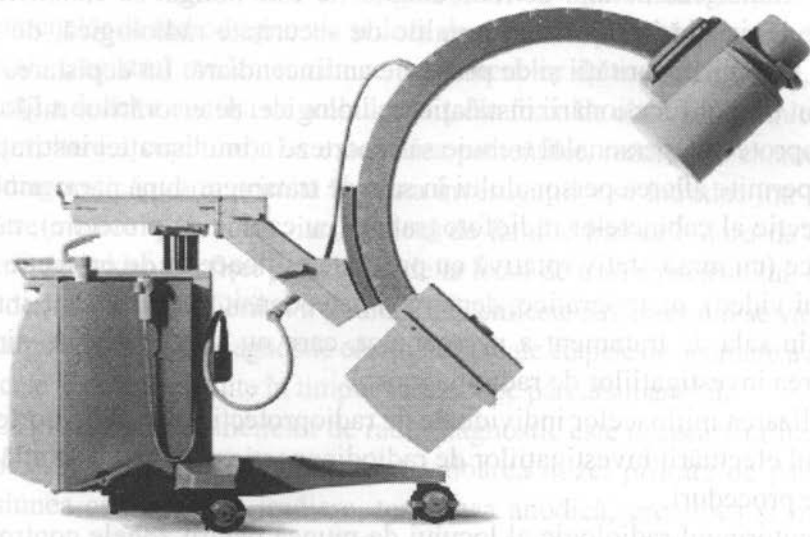


Fig. 93. Cerințe privind securitatea radiologică a personalului.

Cerințe privind securitatea radiologică a personalului.

Securitatea radiologică a personalului secției (cabinetului) de radiodiagnostic se asigură prin:

- a) sistemul de măsuri de protecție cu caracter constructiv la producerea utilajului radiologic;
- b) măsurile organizatorice la exploatarea utilajului radiologic;
- c) folosirea mijloacelor de radioprotecție staționare, mobile și individuale;
- d) selectarea condițiilor optime de efectuare a investigațiilor de radiodiagnostic;
- e) efectuarea controlului radiațional.

La exploatarea aparatelor de radiodiagnostic sunt admise persoanele, care au împlinit vârsta de 18 ani, au certificatul corespunzător de studii în domeniu, au fost instruiți și li s-au evaluat cunoștințele privind asigurarea securității, privind documentele și instrucțiunile normative în vigoare, inclusiv ale instituției medico-sanitare. Administrația instituției medicale este obligată să organizeze efectuarea examenului medical obligatoriu până la angajarea în câmpul muncii și periodic (o dată în an) a persoanelor expuse profesional. În câmpul muncii se admit persoanele, care nu au contraindicații medicale. Această cerință se răsfrânge și asupra persoanelor care sunt admise la cursurile de specializare, perfecționare, de rezidențiat, ce pregătesc cadre pentru activitatea în cabinetele de radiodiagnostic.

Personalul cabinetului de radiodiagnostic este obligat să cunoască și să respecte legislația în domeniu, regulile de securitate radiologică, de igiena muncii, tehnicii securității și de protecție antiincendiară. La depistarea încăl-cărilor în timpul funcționării instalației radiologice, deteriorărilor mijloacelor de radioprotecție, personalul trebuie să raporteze administrației instituției.

Se permite aflarea personalului în sala de tratament după paravanul mare de protecție al cabinetelor radiofotografice (cu cabina de protecție), radiodi-agnostice (cu masă-stativ rotativă cu prezența mijloacelor de protecție a mo-nitorului video), mamografice, dentare și osteodensitometrice. Este interzisă aflarea în sala de tratament a persoanelor, care nu sunt implicate direct în efectuarea investigațiilor de radiodiagnostic.

Utilizarea mijloacelor individuale de radioprotecție este obligatorie, dacă în timpul efectuării investigațiilor de radiodiagnostic personalul se află în ca-mera de proceduri.

Monitoringul radiologic al locului de muncă pentru zonele controlate și pentru spațiile adiacente zonelor controlate se realizează prin măsurarea de-bitelor de doză datorate expunerii externe, cu indicarea calității radiațiilor X. Măsurătorile se efectuează de către personalul propriu cu aparatura din dotare sau se controlează de către o persoană calificată în domeniu, supravegheată de un expert acreditat în radioprotecție.

Se interzice activitatea cu surse de radiații ionizante a salariaților care nu au efectuat examene medicale preventive și periodice.

21.2. Radioprotecția pacientului

Scopul protecției pacientului în radiodiagnostic constă în sporirea consi-derabilă a utilității procedurilor în comparare cu prejudiciile posibile aduse pacientului, luând în considerare factorii sociali și economici. În scopul evită-rii iradierii neplanificate a pacientului sau personalului, deteriorările utilajului radiologic trebuie depistate foarte ușor. Erorile umane ca o cauză a iradierii neplanificate trebuie diminuate la minimum.

Prescrierea examenelor de radiodiagnostic poate fi efectuată doar de me-dicul practician în baza rezultatelor clinice justificate. Medicul radiolog, care efectuează aceste examene, este obligat să estimeze în prealabil nivelul doze-lor de iradiere ale pacientului, posibilele reacții și efecte biologice ale orgănis-mului. Medicul practician, care indică, și medicul radiolog, care efectuează examenele de radiodiagnostic, sunt obligați să informeze pacientul despre nivelul dozelor de expunere și despre consecințele posibile ale examenelor în cauză. Responsabilitatea pentru efectuarea examenelor de radiodiagnostic o poartă numai medicul radiolog, care decide în definitiv volumul și tipurile investigațiilor necesare pacientului.

Medicul radiolog (tehnicianul radiolog) este obligat să înregistreze rezultatele examenelor de radiodiagnostic și doza de expunere primită de pacient în actele medicale (registrul evidenței zilnice a examenelor de radiodiagnostic, foaia de evidență a dozelor din fișa de ambulatoriu, din foaia de observație clinică sau cea de dezvoltare a copilului). La externarea pacienților, rezultatele examenelor de radiodiagnostic și doza primită în urma investigațiilor se introduc într-un extras de către medicul practician, iar medicul de familie transcrie doza de expunere în foaia de evidență a fișei personale (de la locul de trai) a pacientului. În scopul excluderii dublării iradierii și a iradierii nejustificate a pacientului se va ține cont de examenele de radiodiagnostic efectuate la toate etapele de acordare a asistenței medicale și dozele primite în timpul acestora pe parcursul anului.

La efectuarea examenelor de radiodiagnostic este necesară utilizarea factorilor și acțiunilor care diminuează valoarea dozei primite de pacient (dimensiunea câmpului de iradiere, tensiunea anodică, grosimea și materialul filtrului, expoziția ($\text{mA} \times \text{s}$), diafragmarea fasciculului de iradiere, distanța spot focal-film, sensibilitatea film-folie, utilizarea mijloacelor suplimentare de ecranare, selectarea condițiilor tehnice optime de procesare a filmului radiografic și aplicarea tehnologiilor performante).

În scopul diminuării dozei de iradiere a pacientului (și operatorului) până la minimum este important de a folosi următoarele procedee:

- diminuarea dimensiunii fasciculului de radiație până la minimum posibil corespunzător cerințelor clinice pentru tipul concret de cercetare;
- centrarea exactă a fasciculului de radiație și selectarea poziției optime a pacientului.

Utilajul trebuie să aibă colimator în scopul limitării suprafeței câmpului de iradiere până la cea de interes clinic (*fig. 94*).

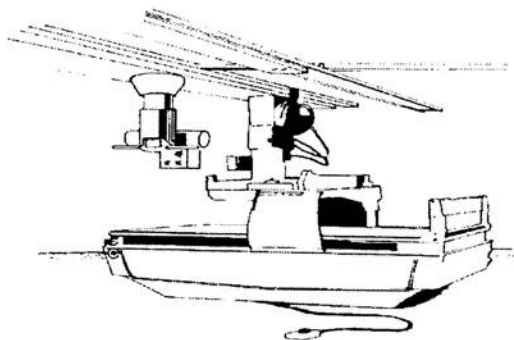


Fig. 94. Diafragme de reglare în radiografie.

Utilajul din radiografie și mamografie (cu excepția utilajului din radiografia dentară) trebuie să aibă spotul fascicului de radiații văzut în condiții normale de iluminare (fig. 95).

Utilajul radiologic mobil sau portativ se folosește numai în cazul investigațiilor, când transportarea pacienților în secția radiologică este imposibilă din punct de vedere practic sau medical, de exemplu în saloane și în sălile de operații și numai după luarea măsurilor de protecție radiologică.

Utilajul radiologic digital trebuie să fie asigurat cu: monitoare de capacitate înaltă; calculatoare/rețele; sistem informațional radiologic asigurat cu programe; sistem de arhivare și transmitere a imaginilor grafice; rețele de conectare a spitalelor la sistemul informațional.

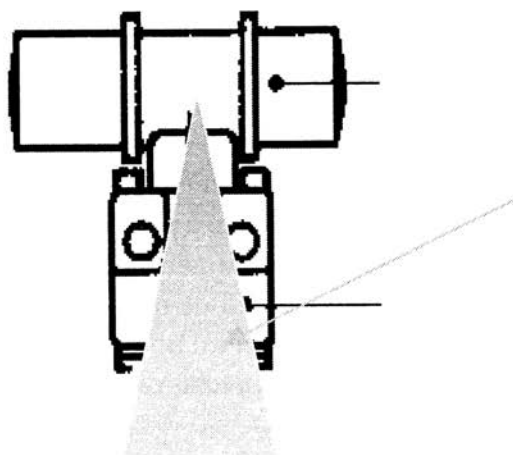


Fig. 95. Identificarea traiectoriei luminii cu cea a fascicului radiologic.

Pentru diminuarea dozei de iradiere a pacienților este necesară diafragma fascicului primar de iradiere, în așa fel, încât pe toate marginile filmului radiografic să fie vizibilă o fâșie transparentă de film cu lățimea nu mai mică de 10 mm.

Utilajul radiosopic utilizat în intervențiile radiologice trebuie să corespundă normelor naționale și internaționale: să asigure cerințele necesare fiecărui tip de investigații de intervenție și să aibă corespunzător acestor investigații caracteristicile de lucru; permanent trebuie să se modernizeze din contul asigurării cu utilaj economic efectiv, care permite diminuarea dozei și sporirea calității imaginii; trebuie să aibă indicator de evidență a dozelor, adică să aibă un indicator permanent de măsurare a dozei pacientului.

21.3. Pericolul procedurilor, intervențiilor radiologice pentru pacient

Intervenția radiologică folosește radiosopia în scopul efectuării investigațiilor invazive, în plan principal cu scop de terapie, intervenția chirurgicală se face sub anestezie și/sau preparate sedative. Deși în aceste scopuri, de obicei, se folosește radiosopia, tomografia computerizată și metodele de ultrasunet, de asemenea, pot fi folosite. Intervențiile radiologice, în comparație cu alte investigații radiologice, pot fi legate cu o iradiere de lungă durată în complex cu iradierea radiografică. Dozele de iradiere ale pacienților și personalului pot fi foarte sporite și pot afecta sănătatea pacientului (aparitia efectelor deterministice).

Procedurile intervențiilor radiologice trebuie să fie efectuate în încăperi și la utilaj destinate special acestui scop. Utilizatorii utilajului (radiologii, cardiologii, urologii etc.) trebuie să aibă instruire specială în domeniul protecției radiologice și securității. Programul de asigurare a calității trebuie să includă un control strict al dozelor, deoarece pericolul apariției efectelor deterministice (la pacienți și personal) poate fi considerabil. Pe parcursul tuturor investigațiilor trebuie să fie indicată puterea dozei în timp real, iar doza sumară pentru fiecare investigație trebuie să fie înregistrată. În organizațiile care practică intervențiile radiologice toate cazurile de acțiune asupra pacienților cu doze mari trebuie să fie înregistrate.

În scopul asigurării securității personalului și a pacienților în timpul efectuării examenelor de radiodiagnostic se stabilește lista mijloacelor mobile și individuale de radioprotecție. Toate cabinetele de radiodiagnostic trebuie să fie dotate cu mijloace de radioprotecție, în funcție de tipurile examenelor de radiodiagnostic efectuate. Toate mijloacele de radioprotecție ale personalului și ale pacienților se divizează în mobile și individuale.

Echipamentul de protecție din plumb (șorțuri sau echipament de protecție pentru gonade) trebuie să acopere regiunea bazinului la toți bărbații și femeile în perioada de preclimacteriu. Echipamentul de protecție trebuie amplasat la suprafața corpului (*fig. 96, fig. 97*). În timpul efectuării examenelor de radiodiagnostic este obligatorie ecranarea bazinului, glandei tiroide, cristalinelui și a altor regiuni ale corpului, în special, la persoanele de vârstă reproductivă. La copii este obligatorie protecția integrală a corpului cu excepția regiunii examinate.

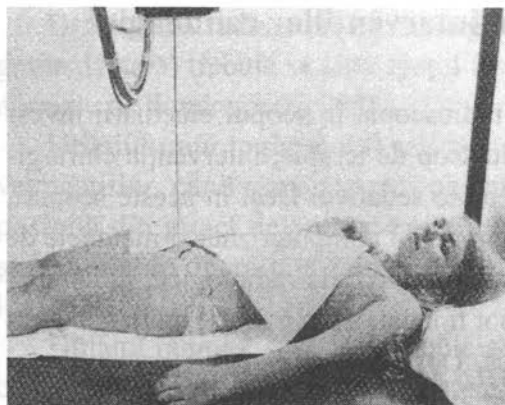


Fig. 96. Echipament de protecție.



Fig. 97. Echipament de protecție.

Responsabilitatea principală pentru depistarea pacienților gravide o poartă medicul, care dă îndreptarea. Radiologii poartă responsabilitatea secundară. Investigațiile radiologice ale abdomenului și bazinului la femei gravide sau cu presupunere la graviditate trebuie evitate, numai dacă pentru efectuarea lor nu sunt dovezi clinice serioase. Dacă pacienta este gravidă sau se presupune că este gravidă, ea trebuie îndreptată la radiolog care decide raționalitatea investigației. Examenul de radiodiagnostic al femeilor gravide se efectuează numai în cazul existenței indicațiilor clinice stricte cu utilizarea obligatorie a tuturor mijloacelor posibile de radioprotecție, astfel, ca doza de expunere a fătului, acumulată pe parcursul a 2 luni de la presupunerea existenței gravidității, să nu depășească 1 mSv.

În timpul examenelor de radiodiagnostic pentru copiii de vârstă mică se utilizează dispozitive speciale de imobilizare, ce exclud necesitatea ajutorului din partea personalului. Toate persoanele, implicate în asemenea investigații, trebuie instruite în prealabil și asigurate obligatoriu și suficient cu mijloace individuale de radioprotecție. Nu sunt supuse examenelor de radiodiagnostic cu scop profilactic în masă adolescenții până la 16 ani.

21.4. Controlul calității

Examenul de radiodiagnostic poate fi considerat eficient atunci când acesta oferă o informație adecvată de radiodiagnostic cu un risc minim pentru sănătatea pacientului și a personalului și un preț de cost mic.

Controlul calității reprezintă verificarea parametrilor de exploatare a instalației de radiodiagnostic, cu/fără amplificator al imaginii radiologice (AIR)

și a utilajului camerei obscure, care influențează direct sau indirect asigurarea radioprotecției pacienților și a personalului. El este efectuat prin:

- a) testarea tipurilor noi și a celor modernizate de instalații de radiodiagnostic;
- b) executarea testelor de acceptare după montare, ca parte a procesului de punere în funcțiune înainte de prima utilizare în radiodiagnostic;
- c) verificarea periodică instrumentală a parametrilor de funcționare a utilajului de radiodiagnostic medical aflat în exploatare;
- d) verificarea permanentă a parametrilor de exploatare a utilajului de radiodiagnostic (testarea stabilității parametrilor).

Parametrii principali de exploatare a acestor instalații, inclusiv a amplificatorului imaginii radiologice, sunt:

- a) precizia obținerii valorilor tensiunii curenului anodic (kV);
- b) precizia obținerii valorilor produsului dintre intensitatea curenului și durata expoziției ($\text{mA} \times \text{s}$);
- c) exactitatea obținerii duratei timpului de expunere (s);
- d) coincidența dozelor de iradiere în regim manual și regim automat;
- e) liniaritatea dozei de iradiere în cazul tensiunii anodice prestabilite;
- f) verificarea securității radiaționale a tubului radiogen în cazul existenței unei flanșe;
- g) estimarea parametrilor radiației de accelerație din cupolă;
- h) existența semnalizării duratei timpului de expunere, ce depășește 5 min.;
- i) coincidența câmpului luminos cu cel de iradiere;
- j) verificarea devierii fasciculului central de iradiere în cazul modificării poziției stativului și a distanței focale;
- k) efortul deplasării segmentelor mobile ale dispozitivului ecran-film al instalației;
- l) unghiul și profunzimea secțiunii tomografice;
- m) precizia obținerii valorii stratului de semiatenuare (filtrarea).

Parametrii principali de exploatare a utilajului camerei obscure:

- a) inactivitatea iluminării camerei obscure;
- b) stabilitatea funcționării termostatului;
- c) precizia ceasului de expunere din camera obscură;
- d) temperatura și durata uscării radio(foto)gرافیilor în dulapul de uscare.

Volumul testării parametrilor, supuși verificării pe parcursul exploatării utilajului de radiodiagnostic în timpul controlului ordinar, se efectuează de către personalul secției(cabinetului) de radiodiagnostic și include:

- a) funcționarea normală a exponometrului;
- b) verificarea coincidenței câmpului de iradiere cu cel luminos;
- c) controlul perpendicularității fasciculului principal de raze cu suprafața receptorilor de imagine;
- d) estimarea funcționării frânelor stativelor;
- e) evaluarea eficacității programului de divizare a câmpurilor casetelor în dispozitivul ecran-film;
- f) aprecierea funcționării corecte a anexei tomografice;
- g) verificarea foliilor și a casetelor pentru radiografie;
- h) controlul funcționării convertizorului de imagine;
- i) verificarea inactinicității iluminării în camera obscură;
- k) verificarea funcționării bacurilor-tancurilor, dulapurilor de uscare și a ceasului de expunere din camera obscură;
- l) determinarea calității soluțiilor pentru prelucrarea fotochimică a filmelor radio(foto)grafice;
- m) evaluarea calității filmelor radio(foto)grafice.

21.5. Dozele de iradiere a pacienților

Pentru estimarea dozelor efective de iradiere a pacienților este utilizată dozimetria clinică. În cazurile când evaluarea acestor doze nu este posibilă prin metode instrumentale sunt utilizate valorile medii ale dozelor efective de iradiere a pacienților expuse în *tabelul 33*.

Tabelul 33

Valorile medii ale dozelor efective (E) pentru cele mai frecvente investigații de radiodiagnostic la aplicarea valorilor standard ale tensiunii anodice și ale expoziției, determinate în baza datelor experimentale

Vârsta pacientului – de la treisprezece până la nouăsprezece ani (13–19 ani)					
Regiunea examinată	Metoda de examinare	Incidența	Tensiunea [kV]	Expoziția [mAs]	E, [μSv]
Plămâni	G	PA	63	10	71
Plămâni	G	LAT	69	24	181
Plămâni	S	PA	69	60	3310

Plămâni	RF	PA	70	50	468
Craniu	G	AP	69	70	70
Craniu	G	LAT	63	60	38
Porțiunea cervicală a coloanei vertebrale	G	PA	63	30	36
Porțiunea cervicală a coloanei vertebrale	G	LAT	63	20	15
Porțiunea toracală a coloanei vertebrale	G	AP	69	50	452
Porțiunea toracală a coloanei vertebrale	G	LAT	76	60	227
Porțiunea lombară a coloanei vertebrale	G	AP	76	60	680
Porțiunea lombară a coloanei vertebrale	G	LAT	76	70	251
Umăr, claviculă	G	AP	57	10	3,2
Coastă, stern	G	AP	63	60	451
Bazin, sacrum	G	AP	69	60	482
Bazin, sacrum	G	LAT	76	150	718
Articulația coxo-femurală	G	AP	63	60	523
Femur	G	AP	63	30	7,1

Cavitatea abdominală	G	PA	70	40	395
Cavitatea abdominală	G	LAT	80	90	764
Stomac	S	PA	76	60	1100
Stomac	G	PA	69	30	81
Stomac	G	LAT	69	40	129
Intestin	S	PA	70	60	1560
Intestin	G	PA	69	30	226
Colecistografia	G	PA	69	60	271
Urografia	G	PA	69	60	331
Cistografia	G	PA	69	60	361
Vârsta pacientului – mai mult de nouăsprezece ani (maturi) (>19 ani)					
Plămâni	G	PA	80	25	152
Plămâni	G	LAT	90	60	374
Plămâni	S	PA	77	60	1830
Plămâni	S+AIR	PA	63	32	400
Plămâni	RF	PA	80	60	810
Craniu	G	AP	70	100	229
Craniu	G	LAT	70	100	104
Porțiunea cervicală a coloanei vertebrale	G	PA	70	80	137
Porțiunea cervicală a coloanei vertebrale	G	LAT	70	80	308
Porțiunea toracală a coloanei vertebrale	G	AP	75	80	685
Porțiunea toracală a coloanei vertebrale	G	LAT	80	80	470

Porțiunea lombară a coloanei vertebrale	G	AP	80	170	1920
Porțiunea lombară a coloanei vertebrale	G	LAT	90	250	1400
Umăr, claviculă	G	AP	70	60	100
Coastă, stern	G	AP	75	80	783
Bazin, sacrum	G	AP	80	150	2230
Bazin, sacrum	G	LAT	90	220	1570
Articulația coxo-femurală	G	AP	75	120	1470
Femur	G	AP	70	75	109
Esofag	S	PA	90	60	1950
Esofag	S+AIR	PA	60	30	237
Stomac	R/S	PA	88	60	1760
Stomac	S+AIR	PA	83	27	600
Stomac	G	PA	69	30	90
Stomac	G	LAT	69	40	104
Intestin	S	PA	90	60	2600
Intestin	G	PA	90	120	2390
Intestin	G	LAT	95	140	1970
Colecistografia	G	PA	85	125	1005
Urografia	G	PA	80	60	594
Cistografia	G	PA	69	60	482

21.6. Utilizarea radiațiilor ionizante în radioterapie și brahiterapie

Una dintre principalele metode de tratament al cancerului este, în mod paradoxal, cea de iradiere cu doze foarte mari de radiații a țesuturilor maligne, care duce la distrugerea unor celule tumorale. Radioterapia fiind una dintre principalele modalități de tratament al cancerului (ade-

sea în combinație cu chimioterapia și chirurgia), se presupune că de ea beneficiază 50-60% din pacienții cu cancer, rolul ei este, însă, minor în alte boli.

În această terapie sunt utilizate în mod frecvent radiațiile X de mare energie, radiațiile gama date de surse închise de cobalt-60, iar în ultimul timp se utilizează fascicule de neutroni și electroni. Pentru distrugerea celulelor tumorale din tiroidă se administrează radionuclidul iod-131 în activitate foarte mare (10^9 Bq). Este interesant că același radionuclid se utilizează și pentru obținerea unor scintigrafii tiroidiene prin care se vizualizează starea funcțională a tiroidei, dar în activitate mult mai mică (10^5 Bq).

Radioterapia poate fi efectuată prin două modalități:

1. Radioterapia externă, când doza este eliberată din afară pacientului folosind raze X, raze gama sau electroni cu energie înaltă.
2. Brahiterapia, când doza este eliberată dintr-o sursă radioactivă implantată pacientului în apropiere de țintă („brachys” în greacă înseamnă distanță scurtă).

21.7. Radioterapia cu fascicul extern

Mai mult de 90% dintre toți pacienții care fac radioterapie sunt tratați folosind radioterapia externă. Cea mai mare parte a acestora sunt tratați folosind radiații X între 20 keV și 20 MeV. Alte opțiuni sunt: telegamaterapia (Co-60 și Cs-137), electronii de la acceleratoarele liniare și acceleratorii pentru particule încărcate grele (cum ar fi protonii). În mod obișnuit sunt fracționate, ca exemplu, 30 de fracțiuni zilnice a câte 2Gy până la o doză totală de 60Gy.

Procesul de radioterapie externă constă din următoarele etape: diagnosticul, anamneza, trecerea prin simulator sau CT, planul de tratament, conceperea tratamentului și verificarea datelor, simularea (virtuală sau reală), tratamentul, verificarea și urmărirea tratamentului.

În procesul radioterapeutic, simulatorul este deseori folosit de două ori: pentru acumularea de date privind pacientul – localizarea țintei, stabilirea contururilor și a proiecțiilor; pentru operația de verificare – acumularea de imagini de referință pentru verificare. Simulatorul poate fi înlocuit cu echipament radiodiagnostic ori simulare virtuală (*fig. 98*).

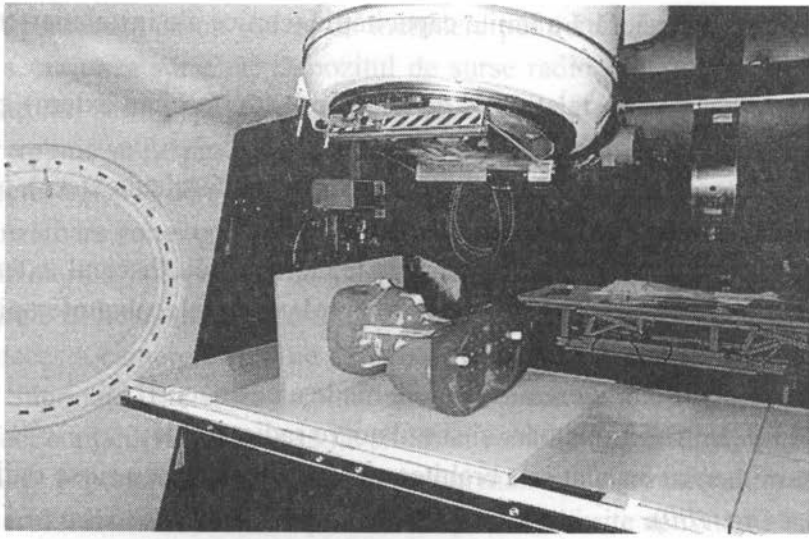


Fig. 98. Aparat de radioterapie.

Laboratorul de brahiterapie manuală este compus din: camera de stocare și de pregătire a surselor radioactive; camera de aplicație (fig. 99); camera de planificare a tratamentului; camera de tratament; camera de consultații medicale; camera pentru personalul medical; vestiar, grup sanitar pentru personal și grup sanitar pentru pacienți.

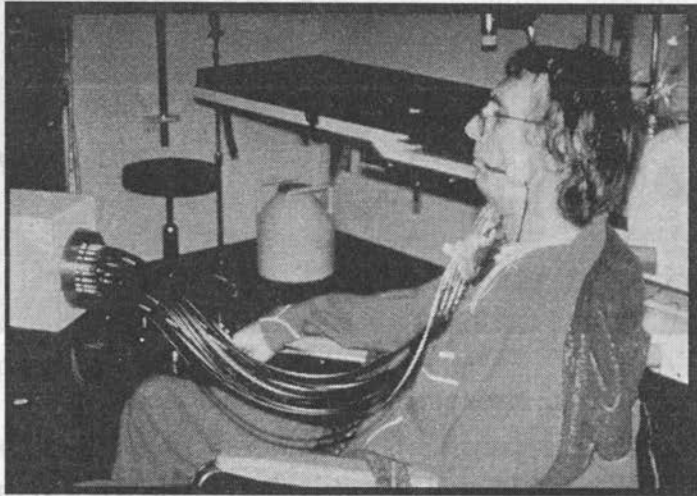


Fig. 99. Sesiune de brahiterapie.

Ecranele, altele decât peretii camerei de tratament, vor fi proiectate astfel încât debitul dozei să nu depășească $1 \mu\text{Sv/h}$. Suprafața minimă a camerei de

tratament, fără șicană, fără a limita capacitățile tehnice ale instalației, trebuie să fie de minimum:

- a) 16 m² pentru o instalație RX de teleterapie (cu fascicul extern), pentru terapie superficială și de contact;
- b) 22 m² pentru o instalație RX de teleterapie (cu fascicul extern), terapie de ortovoltaj cu tensiunea electrică de până la 300 kV;
- c) 50 m² pentru o instalație gama de teleterapie (cu fascicul extern) cu surse radioactive închise, ca de exemplu o instalație de telecobaltoterapie care conține o sursă de cobalt-60;
- d) 50 m² pentru acceleratoare liniare medicale (linacuri);
- e) 30 m² pentru simulatoare și simulatoare radioterapie;
- f) 16 m² pentru instalații de brahiterapie (curieterapie) cu surse radioactive închise (fig. 100).

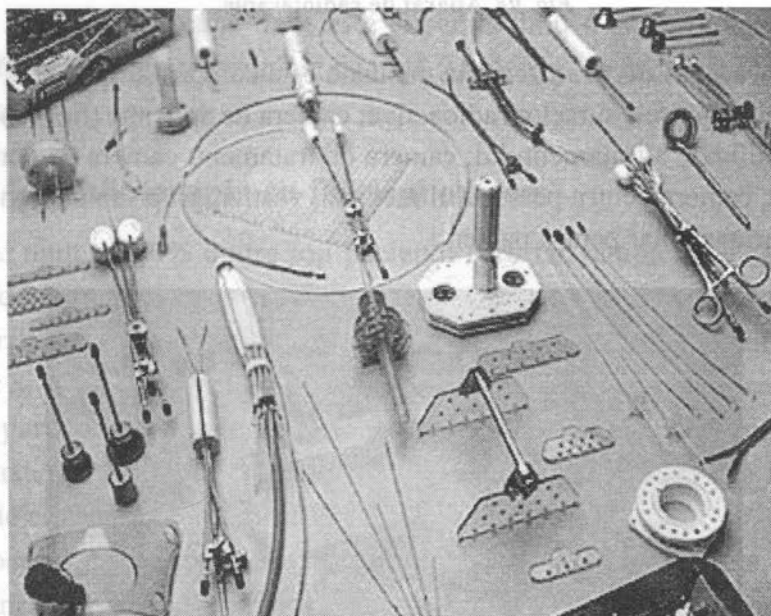


Fig. 100. Aplicatori pentru brahiterapie.

21.8. Cerințele de securitate pentru stocarea și pregătirea surselor radioactive închise

Pentru brahiterapia manuală sunt necesare următoarele cerințe: se va utiliza o cameră special destinată numai pentru stocarea și pregătirea surselor de către personalul pregătit și desemnat; ușa camerei de stocare și de pregă-

tire va fi prevăzută cu un sistem de închidere pentru a controla accesul și a asigura securitatea surselor. Depozitul de surse radioactive care poate fi în afara spațiului sau în spațiul existent al camerei de stocare și de pregătire a surselor trebuie să fie prevăzut cu: sistem de închidere corespunzător, sistem de protecție fizică și de securitate radiologică a surselor radioactive, etichete corespunzătoare zonei controlate, sistem de avertizare a nivelului de radiații, sistem de alarmă și avertizare de incendiu.

Trebuie să fie afișate simbolul pericolului de radiații ionizante, la fiecare ușă de acces a camerei. Trebuie să existe un container ecranat pentru toate sursele. Suprafața exterioară a containerului trebuie să fie din material rezistent la foc; containerul trebuie să fie situat în vecinătatea mesei de lucru pentru a reduce expunerea personalului în timpul mânăuirii și transferului surselor. Containerul trebuie să aibă compartimente pentru diferite activități ale surselor; fiecare compartiment trebuie să fie marcat astfel încât să permită imediat și ușor identificarea conținutului acesteia din exterior cu o expunere minimă.

Masa de lucru trebuie să fie prevăzută cu o ecranare din blocuri în formă de L cu o fereastră de vizualizare din sticlă cu plumb. Aria de mânăuire a surselor trebuie să fie bine iluminată (minimum 500 lucși) și prevăzută cu o lupă montată într-o poziție fixă în scopul de a mânui sursele eficient și cu un minimum de expunere.

Trebuie să fie disponibile dispozitive de mânăuire a surselor, de obicei, forceps. Aceste dispozitive trebuie să fie cât mai lungi, cât este posibil practic, compatibile cu mânăuirea eficientă a sursei. Trebuie să fie prevăzute dispozitive pentru prinderea sursei expeditiv cu degetele protejate de distanță.

Finisajele camerei trebuie să permită decontaminarea eficientă a acesteia, prevăzută cu colțuri rotunjite, suprafețe lavabile, scurgeri în pardoseală, ventilație și climatizare adecvată. Instrumentele de sterilizare pentru aplicatorii cu preîncărcare trebuie să fie disponibile în camera de pregătire sau de tratament în scopul asigurării unei protecții suficiente.

Trebuie să existe o indicare clară a nivelului de radiație. De asemenea, trebuie să existe un monitor de radiații de arie cu prag de avertizare, vizibil la intrarea în cameră și în timpul mânăuirii surselor neecranate, un dozimetru de arie disponibil și în funcțiune în timpul mânăuirii surselor neecranate.

Sunt necesare spații disponibile pentru stocarea în siguranță a surselor expirate pentru a permite dezintegrarea surselor cu timpi de înjumătățire mici, ca de exemplu ¹⁹²Ir. Containerele de transport purtate manual trebuie să fie

prevăzute cu mânăre lungi și capac al containerului cu închidere sigură pentru a preveni bascularea și scăparea surselor în timpul transportului.

21.9. Radioprotecția pacienților în radioterapie

Pentru expunerile medicale în scop terapeutic, optimizarea protecției este esențială și se realizează prin menținerea expunerii țesuturilor sănătoase ale pacientului la un nivel cât mai mic posibil de realizat în mod rezonabil, în raport cu eliberarea dozei necesare în volumul-țintă planificat. Organele adiacente volumului-țintă se vor ecrana corespunzător dacă este posibil și adecvat.

Trebuie să fie evitate procedurile radioterapeutice care cauzează expunerea abdomenului sau a pelvisului unei paciente care este gravidă sau ar putea fi, în afară de cazul când există motive clinice suficiente pentru astfel de expuneri.

Orice expunere în scop terapeutic a unei femei cu capacitate reproductivă trebuie să fie planificată pentru a elibera doza minimă în orice embrion sau fetus care ar putea fi prezent.

Titularul de autorizație trebuie să furnizeze instrucțiuni scrise pentru persoanele-membri de familie, care au în grijă pacienți de brahiterapie cu implanturi permanente de surse radioactive, privind măsurile necesare ce trebuie luate pentru reducerea dozelor încasate de persoanele care vin în contact cu acești pacienți, în special copii sau femei potențial gravide.

21.10. Igiena muncii, principiile de radioprotecție la utilizarea surselor închise de radiații ionizante

Scopul declarat al protecției radiologice este de a preveni apariția efectelor deterministice prin menținerea dozelor sub pragul de apariție al acestora și să realizeze toate măsurile necesare, rezonabile, de reducere a inducerii efectelor stocastice.

Principiile protecției radiologice la utilizarea surselor închise de radiații ionizante sunt următoarele: 1) timpul; 2) distanța; 3) ecranarea.

Timpul este un factor important în protecția radiologică. Expunerea totală a unui individ este direct proporțională cu durata de timp cât el este expus acțiunii sursei. Principiul precizează că, cu cât timpul de expunere în câmpul de radiații este mai mic, cu atât doza primită este mai mică. De

aceea, este preferabil ca individul să nu petreacă mai mult timp decât este necesar în apropierea sursei de radiații. O rotație a membrilor echipei poate menține expunerea individuală la minimum.

Intensitatea sursei de radiații variază invers proporțional cu pătratul distanței. De aceea se recomandă ca expusul profesional la radiații ionizante să păstreze o distanță cât mai mare posibil între el și sursa de radiații. Măsurând rata expunerii la o distanță dată față de o sursă de radiații și repetând măsurarea după dublarea distanței, intensitatea expunerii scade cu factorul 4.

Unul din mijloacele de protecție a personalului care lucrează cu surse de radiații este ecranul de protecție sau ecranarea. Alegerea materialului și calculul grosimii ecranului se fac astfel încât debitul dozei efective la perețele său exterior să se reducă la valoarea expunerii limită pe durata lucrului programat în acel loc. Diferite materiale care au proprietatea de a absorbi radiațiile pot fi folosite pentru a oferi o protecție radiologică. Radiațiile gama sunt puternic penetrante și de aceea trebuie folosite materiale speciale, înalt absorbante pentru sursele emițătoare gama. Din motive economice, plumbul este cel mai frecvent folosit în acest scop. Injectarea dozelor pentru pacienți trebuie făcută cu seringi ecranate.

Monitorizarea locurilor de muncă are ca scop: controlul contaminării radioactive a locurilor de muncă; completarea, verificarea și evaluarea indirectă a dozelor individuale; delimitarea zonelor (controlată, supravegheată); evaluarea expunerilor colective.

Măsurători periodice cu dozimetre portabile se fac: a) în locuri speciale pentru personal: camera de comandă, arii de lucru, în afara camerei de expunere; b) în locuri speciale pentru public: camere de așteptare, arii frecventate în afara camerei de expunere.

Administrația instituției trebuie să asigure: dotarea lucrătorilor cu echipamentul de protecție corespunzător; instruirea personalului asupra modului de folosire; testarea calității echipamentului; menținerea în condiții corespunzătoare și înlocuirea la nevoie a acestuia.

Dozele de iradiere a pacienților

Cadrul de bază al protecției radiologice trebuie să includă rațiuni științifice și sociale pentru că scopul principal este să asigure un standard adecvat de protecție fără să limiteze excesiv practicile benefice.

Dozele pentru brahiterapie

<i>Debit de doză joasă</i>	< 1Gy/oră – în jurul valorii 0,5Gy/oră
<i>Debit de doză medie</i>	1Gy/oră (nu este utilizat)
<i>Debit de doză mare</i>	>10Gy/oră
<i>Debit de doză pulsator</i>	pulsuri în jurul valorii de 1Gy/oră

21.11. Utilizarea radiațiilor ionizante în medicina nucleară

Medicina nucleară s-a extins considerabil în ultimii ani ca rezultat al dezvoltării scintigrafiei, a tehnicilor avansate ce folosesc trăsori radioactivi și a camerei cu pozitroni. Drept rezultat, utilizarea medicinei nucleare în medicina preventivă, în diagnostic și în terapie a devenit din ce în ce mai obișnuită (fig. 101).

Categoriile de amenajare ale laboratorului de medicină nucleară reprezintă gradul de protecție permis și sunt:

- categoria 1: laboratoare de medicină nucleară pentru terapie;
- categoria 2: laboratoare de medicină nucleară pentru diagnostic „*in vivo*”;
- categoria 3: laboratoare de medicină nucleară pentru diagnostic „*in vitro*”.

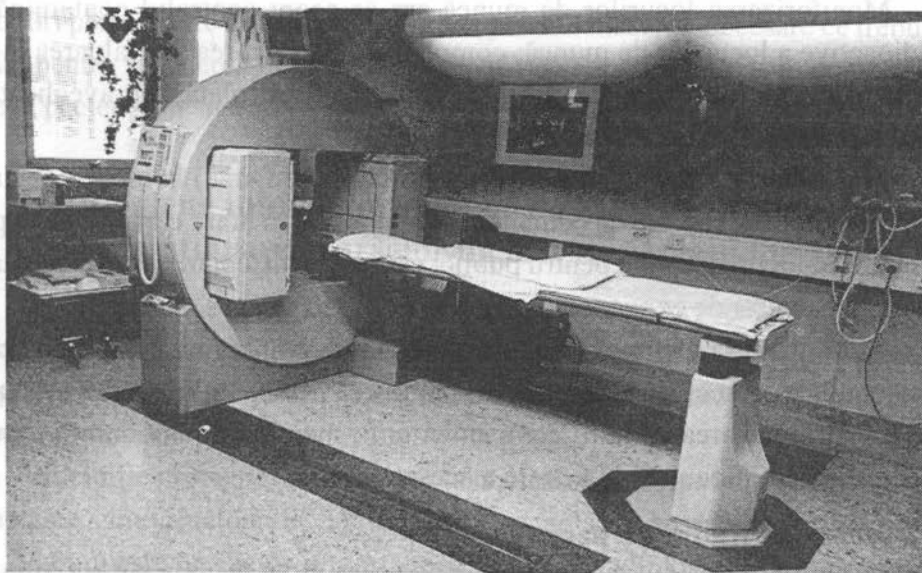


Fig. 101. Laborator de medicină nucleară.

21.12. Cerințe pentru amplasarea și amenajarea laboratoarelor destinate desfășurării practicii de medicină nucleară

Laboratoarele de medicină nucleară destinate terapiei cu surse radioactive trebuie amplasate, pe cât este posibil, în clădiri speciale sau, dacă acest lucru nu este posibil, obligatoriu, într-o aripă complet izolată de restul clădirii, la parter și cu intrare separată. Laboratoarele de medicină nucleară destinate radiodiagnosticului „*in vitro*” cu surse radioactive nu necesită asigurarea unor condiții speciale de amplasare.

În cazul amplasării laboratoarelor de medicină nucleară în interiorul unor clădiri în care se desfășoară și alte activități, încăperile în care se desfășoară activitățile specifice laboratorului vor fi amplasate într-o singură parte a clădirii, separate de alte activități nenucleare, astfel încât să fie asigurat circuitul funcțional al laboratorului.

În cazul laboratoarelor în care se utilizează surse radioactive pentru diagnostic „*in vivo*” și pentru terapie, unitățile de comandă ale instalațiilor de încălzire, alimentare cu gaze naturale, alimentare cu apă și a instalațiilor electrice trebuie amplasate în exteriorul încăperilor în care se desfășoară activitatea.

În cazul laboratoarelor de medicină nucleară în care se utilizează surse radioactive pentru diagnostic „*in vitro/in vivo*” și pentru terapie, pardoselile, tâmplăria și suprafețele de lucru din încăperi trebuie realizate astfel, încât să poată fi ușor spălate și decontaminate. Mobilierul utilizat în laboratoarele de medicină nucleară trebuie să fie de construcție cât mai simplă, să aibă o suprafață netedă, neabsorbantă și să fie ușor de decontaminat. Pereții și tavanul se vor executa fără niciun fel de profil sau ornamente, cu toate unghiurile executate etanș și rotunjite și se vor acoperi cu materiale neabsorbante, ușor lavabile și rezistente la acțiunea agenților de decontaminare.

Laboratoarele de medicină nucleară în care se utilizează surse radioactive pentru diagnostic „*in vivo*” trebuie să fie prevăzute cu: camere prevăzute cu nișe, boxe sau alte incinte ventilate și ecranate conform reglementărilor în vigoare pentru prepararea radiofarmaceuticelor și efectuarea diluțiilor de substanțe radioactive; încăpere destinată depozitării surselor radioactive și/sau a deșeurilor radioactive; camere pentru injectarea pacienților sau administrarea radiofarmaceuticelor; cameră pentru efectuarea investigațiilor diagnostice medicale „*in vivo*”; cabinet de consultații pentru medicul practician; săli de așteptare separate pentru pacienții cărora li s-au administrat produse radiofarmaceutice și pentru cei cărora nu li s-au administrat radiofarmaceutice; instalație de dușuri pentru personal; punct de control dozimetric; spațiu

pentru decontaminarea și sterilizarea instrumentarului tehnico-medical; conținere pentru colectarea și depozitarea temporară a deșeurilor radioactive provenite din desfășurarea practicii; grup sanitar pentru pacienții cărora li s-au administrat radiofarmaceutice, separat de grupul sanitar al personalului sau al pacienților cărora nu li s-au administrat radiofarmaceutice.

Principiile de radioprotecție la utilizarea radiofarmaceuticelor sunt:

- **justificarea** – introducerea, în practică, a unor noi tehnici de medicină nucleară trebuie justificată și autorizată de Ministerul Sănătății;
- **optimizarea** – toate expunerile, inclusiv cele potențiale, din cadrul practicii de medicină nucleară trebuie să fie menținute la cel mai scăzut nivel rezonabil posibil, luând în considerare factorii economici și sociali;
- **limitarea dozelor** – limita maximă admisă a dozei efective pentru personalul expus profesional care desfășoară practica de medicină nucleară cu radiații ionizante este cea prevăzută de Normele Fundamentele de radioprotecție (NFRP–2000), (vezi capitolul III).

Clasificarea zonelor

În laboratoarele de medicină nucleară încăperile existente sunt incluse în două zone:

- a) zona controlată;
- b) zona supravegheată.

Camerele de preparare, depozitare, spațiul de depozitare temporară și camera de injectare a radiofarmaceuticelor, camerele de imagistică, sălile de așteptare pentru pacienții cărora li s-a administrat radiofarmaceutic, în scop de diagnostic, saloanele pentru pacienții tratați, depozitele de deșeuri radioactive trebuie clasificate ca *zone controlate*. Zona situată împrejurul zonei controlate este considerată *zonă supravegheată*.

Cerințe pentru zona controlată: avertizare prin semnele prevăzute de NFRP–2000; existența unor instrucțiuni adecvate la punctele de intrare în zonele controlate; existența procedurilor specifice fiecărei zone controlate; controlul accesului, prin proceduri administrative, bariere fizice cu sisteme de comunicare, dacă este cazul, avertizoare luminoase și sonore; existența mijloacelor adecvate pentru schimbarea hainelor, monitorizarea expunerii și contaminării, decontaminarea personalului, plasate la intrarea/ieșirea din zona controlată.

Cerințe pentru zonele supravegheate: semne de avertizare; controlul accesului persoanelor din populație, reglementarea debitului de doză (*tabelul 34*).

Debitele de doză recomandate pentru clasificarea zonelor

Debitul de doză	Valoarea pentru zona controlată	Valoarea pentru zona supravegheată	Valoarea pentru zona nesupravegheată
Instantaneu, mediat pe un minut (IDR)	$>2000\mu\text{Sv/h}$	$>7,5\ \mu\text{Sv/h}$	$<7,5\ \mu\text{Sv/h}$
Mediat pe 8 ore, luând în considerare utilizarea și încărcarea, pentru cazul cel mai defavorabil (TDR)	$>7,5\ \mu\text{Sv/h}$	$>0,5\ \mu\text{Sv/h}$	$<0,5\ \mu\text{Sv/h}$
Mediat pe 2000 de ore, luând în considerare utilizarea și încărcarea, pentru cazul cel mai defavorabil (TADR)	$>3\ \mu\text{Sv/h}$	$>0,15\ \mu\text{Sv/h}$	$<0,15\ \mu\text{Sv/h}$

Radioprotecția pacienților

Medicii specialiști de medicină nucleară asigură radioprotecția pacienților, atât prin prescrierea, cât și prin modul de administrare a dozei. Expunerea persoanelor care susțin sau îngrijesc pacienții, precum și a membrilor familiilor pacienților se supune constrângerilor de doză. Cerințele față de controlul calității sunt îndeplinite în cazul diagnosticului și terapiei cu surse deschise de radiații, prin consultarea unui expert în fizică medicală.

Protocoale scrise pentru fiecare tip de investigație sunt elaborate astfel, încât informația obținută să fie maximă, luând în considerare nivelul de referință pentru respectiva investigație.

Anamneza corectă a pacientului și utilizarea metodelor de blocare a absorbției radiofarmaceuticului în organele nesupuse studiului permit accelerarea excreției radionuclidului.

Protecția împotriva contaminării externe a pacienților, care au primit pe cale orală sau prin inhalare substanțe radioactive, se realizează prin asigurarea unui șorț din material plastic pentru protejarea hainelor.

Doza efectivă a fătului sau copilului alăptat, ca urmare a expunerii medicale a mamei, trebuie să fie mai mică de 1 mSv.

**Doze de radiații primite în timpul anumitor examinări
medicale cu radioizotopi**

Tipul de examinare cu radioizotopi	Radioactivitatea administrată	Elementul radioactiv folosit	Doza pe organul-țintă
Tiroida	37 MBq	Tc 99	2 mSv
Miocard	74 MBq	Tl 201	7 mSv
Oase	550 MBq	Tc 99	4 mSv

Asemenea doze sunt injectate curent pacienților în spitalele de pretutindenii și nu prezintă niciun pericol major pentru sănătatea lor (*tabelul 35*). Iradierea neglijabilă, produsă astfel, este mult mai mare decât cea primită de la radioactivitatea naturală, care la rândul ei este mult mai mare față de cea rezultată din depunerile radioactive datorate testelor cu arme nucleare în atmosferă. La rândul său, această iradiere este mult mai mare decât cea care ne vine din centralele atomo-electrice.

În timpul unei *scintigrafii* (o investigație care folosește încorporarea unui radioizotop gama emitător și un contor de scintilație colimat), pacientul primește o doză de circa 0,2 până la 1 rad (2 până la 10 mSv) (o doză de 300 de ori mai scăzută în prezent decât în 1955). Ca și razele X, scintigrafia este un instrument de diagnostic, iar doza primită este suficient de mică pentru a nu produce efecte nedorite.

Astfel, la o examinare scintigrafică a tiroidei, pacientul este injectat cu iod – 131 radioactiv, care se comportă în organism exact la fel ca iodul natural și migrează în glanda tiroidă. În timp ce iodul radioactiv este acumulat în tiroidă, prezența lui este măsurată cu un contor de scintilație (când atomii de iod-131 se dezintegrează, ei emit raze gama care sunt detectate de contor). Măsurătorile făcute la anumite intervale după injecție arată rata de acumulare a iodului injectat. Hiperactivitatea tiroidei (hipertiroidism) este diagnosticată prin absorbția anormal de mare în glandă a iodului radioactiv. Dacă, dimpotrivă, în tiroidă se acumulează mai puțin iod radioactiv decât în mod normal, diagnosticul este hipotiroidism. Măsurătorile îl ajută pe medicul practician să aleagă tratamentul adecvat pentru disfuncția tiroidiană.

Pentru protecția personalului în medicina nucleară sunt stabilite CMA în aerul zonei de muncă (*tabelul 36*).

**Valorile CMA pentru radionuclizii cel mai des utilizați
în medicina nucleară**

Radionuclid	CMA (Bq/m³)
³ H	3·10 ³
¹⁴ C	1·10 ²
¹⁸ F	5·10 ²
³² P	3·10 ¹
⁵¹ Cr	2·10 ³
⁵⁷ Co	9·10 ¹
⁶⁰ Co	3·10 ⁰
⁶⁷ Ga	3·10 ²
⁶⁸ Ga	1·10 ³
⁸⁹ Sr	1·10 ¹
⁹⁰ Y	5·10 ¹
⁹⁹ Mo	8·10 ¹
^{99m} Tc	3·10 ³
¹¹¹ In	3·10 ²
¹²³ I	4·10 ²
¹²⁴ I	7·10 ⁰
¹²⁵ I	6·10 ⁰
¹³¹ I	4·10 ⁰
¹³⁷ Cs	1·10 ¹
¹⁵³ Sm	1·10 ²
¹⁸⁶ Re	7·10 ¹
²⁰¹ Tl	1·10 ³

UTILIZAREA RADIAȚIILOR IONIZANTE ÎN AGRICULTURĂ, INDUSTRIE

22.1. Utilizarea radiațiilor ionizante în agricultură

Izotopii radioactivi sunt utilizați în cercetările de biotehnologie în calitate de instrument extins pe larg pe parcursul ultimelor decenii.

Principalele probleme ale agriculturii la rezolvarea cărora contribuie izotopi radioactivi fără de care nu este posibilă efectuarea cercetărilor de biologie moleculară sunt:

- determinarea condițiilor de optimizare a introducerii îngrășămintelor minerale și a utilizării eficiente a resurselor de apă pentru irigare, precum și fixarea biologică a azotului;
- obținerea culturilor înalt productive, bine adaptate și rezistente la acțiunea agenților, insectelor nocive prin inducerea cu radiații ionizante a mutațiilor;
- distrugerea insectelor nocive și lupta cu ele, prin sterilizarea sau inducerea mutagenezei;
- ridicarea capacităților de reproducere, ameliorarea rației alimentare și a stării sănătății animalelor cu aplicarea analizei radioimune și a metodelor legate de ea și, de asemenea, a indicatorilor cu izotopi;
- diminuarea pierderilor economice ale recoltei cauzate de încolțirea și contaminarea culturilor agricole;
- diminuarea răspândirii bolilor cu produsele alimentare și prelungirea termenului de păstrare a produselor prin iradierea lor;
- cercetarea căilor de diminuare a contaminării cu pesticide și agrochimicale (*fig. 102*).

Odată cu crearea unei secții unite din cadrul Agenției Internaționale pentru Energia Atomică și a Organizației pentru Alimentație a Organizației Națiunilor Unite activitățile în domeniul metodelor nucleare în industria alimentară se largesc în cadrul țărilor în curs de dezvoltare cu o rentabilitate înaltă. În practica ameliorării plantelor, variabilitatea materialului inițial reprezintă o trăsătură de bază, indispensabilă, constituind câmpul pe care acționează selecția, iar mutageneza reprezintă una dintre metodele de interes în asigurarea diversificării organismelor vii, creând un bogat material calitativ ce poate fi supus acțiunii selecției (*fig. 103*).



Fig. 102. Utilizarea radiațiilor ionizante în agricultură.

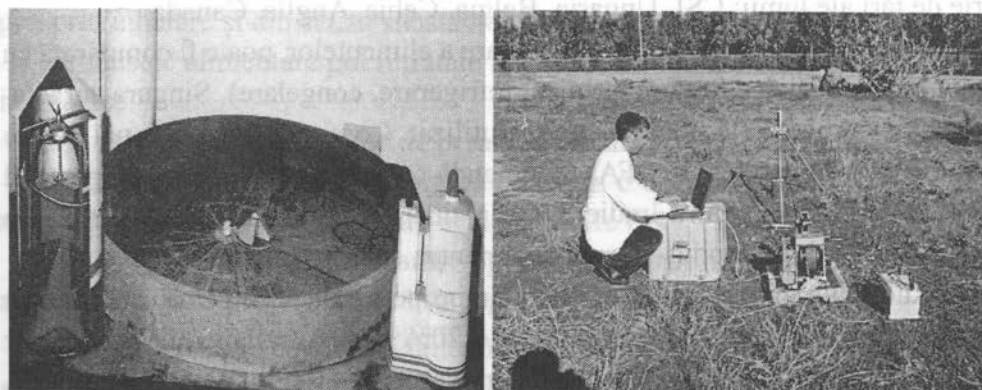


Fig. 103. Iradierea plantelor.

Prin iradiere se pot obține următoarele proprietăți importante dorite:

- o rezistență sporită la factorii climaterici a culturilor agricole;
- obținerea unei recolte mai timpurii care contribuie la eliberarea terenurilor agricole pentru alte culturi;
- o rezistență mai mare la insecte nocive;
- creșterea productivității prin inducerea mutațiilor cu aplicarea metodelor nucleare;

- ameliorarea calității grânelor, sporirea proprietăților (conținutului proteinelor sau uleiurilor), ameliorarea calităților de coacere, reducerea timpului de preparare a produselor alimentare.

La creșterea animalelor prin aplicarea izotopilor radioactivi se obține mărirea masei lor prin ameliorarea alimentației: creșterea numărului animalelor prin programarea ciclului reproductiv, prevenirea bolilor prin producerea vaccinurilor efective prelucrate.

22.2. Utilizarea radiațiilor ionizante în industrie. Iradierea produselor alimentare

Radiațiile ionizante utilizate pe larg în industrie pot fi de natură electromagnetică și corpusculară. Într-un număr sporit de țări s-a dezvoltat aplicația industrială a radiației care prevede iradierea alimentelor. Aceasta înseamnă că alimentele pot fi supuse unei energii înalte sub forma unor fluxuri de raze gama, raze X sau electroni de mare energie. Tehnica dată este din ce în ce mai frecvent folosită pentru a crește durata de păstrare a alimentelor preambalate. Astăzi conservarea alimentelor prin metoda iradierii este practică într-o serie de țări ale lumii: CSI, Ungaria, Belgia, Cehia, Anglia, Canada.

Iradierea, ca procedeu fizic de tratare a alimentelor, poate fi comparată cu alte procedee fizice (tratare termică, refrigerare, congelare). Singura caracteristică a iradierii este tipul de energie utilizat. Comitetul Internațional pentru Iradierea Alimentelor (ICGFA) recomandă ca iradierea să se facă respectând Codul de Practici pentru Iradiere (GPI), ținând cont că la doze mai mici sau egale cu 500 krad produsele sunt apte pentru consum uman.

Radiațiile ionizante sunt utilizate în proporție de 30% pentru sterilizarea produselor medicale și în proporție de 20% pentru tratamentul produselor alimentare. Introducerea tehnicii de iradiere în agricultură și industria alimentară vizează în principal eliminarea microorganismelor (împiedicarea reproducerii și distrugere) care provoacă degradarea produselor agricole. FAO estimează că peste 25% din producția mondială de alimente se pierde după recoltare din cauza atacului dăunătorilor, a microorganismelor, rozătoarelor. Se apreciază că prin iradierea alimentelor se obține și o ameliorare a salubrității acestora, ele putând fi contaminate cu germeni patogeni sau toxicogeni. De asemenea, metoda este utilizată pentru prelungirea duratei de conservare a produselor agricole (cereale, legume), respectiv a produselor alimentare prelucrate tehnologic (inhibarea germinării, întârzierea maturării fructelor și legumelor postrecoltare, radiopasteurizarea și radiosterilizarea alimentelor).

Avantage. Cercetătorii francezi au studiat timp de doi ani efectul procesării laptelui prin iradiere. Studiile de marketing efectuate pe produsul etichetat cu simbolul Radaperta au relevat creșteri ale vânzărilor cu 25%. În 1994, Patrick Boisseu publică în Food Technology un raport cu privire la caracteristicile organoleptice ale brânzei Camembert din lapte iradiat, semnalând că nu au fost detectate modificări ale aromei și consistenței și că asociația producătorilor de brânzeturi din Franța a construit în Normandia o instalație de iradiere a laptelui. Studiile au arătat că eficiența distrugerii microflorei de contaminare face ca aceste produse să fie compatibile cu sistemele de management ale siguranței alimentului HACCP și mai ales că nu induce modificări senzoriale (aromă, culoare).

Eficacitate. Aspectele bacteriologice și senzoriale ale condimentelor, plantelor condimentare și legumelor condimentare stipulate în standardele internaționale, precum Codex Alimentarius, și revendicate de procesatorii care operează cu HACCP sau cu standardele internaționale ISO nu sunt modificate prin această metodă. Iradierea condimentelor, a plantelor și legumelor condimentare nu ridică probleme de sănătate nici pentru consumator, în timp ce conservarea cu dezinfectanții gazoși menționați mai sus are potențial carcinogen prin inhalare și din cauza substanțelor toxice reziduale produse.

Produsele alimentare pot fi tratate numai cu următoarele surse de radiații ionizante:

- a) radiații gama provenite de la radionuclizii cobalt-60 sau cesiu-137;
- b) radiații X produse de aparate operate la o energie nominală (energie maximă a fotonilor) mai mică sau egală cu 5 MeV;
- c) electroni produși de aparate operate la o energie nominală (energie maximă a electronilor) mai mică sau egală cu 10 MeV.

O unitate de iradiere constă dintr-o cameră de iradiere cu pereți din beton sau plumb atât de groși, încât nu scapă nicio radiație. O sursă emițătoare de radiații gama, cel mai adesea cobalt-60 (timp de înjumătățire de 5,3 ani), este plasată în centrul camerei. Procesul constă pur și simplu în plasarea alimentelor în camera de iradiere și expunerea lor până ce primesc doza necesară de radiație. Înainte de începerea procesului obișnuit de iradiere pentru o categorie anumită de produse alimentare se determină pozițiile dozelor minimă și maximă prin efectuarea de măsurări de doză în tot volumul produsului. Aceste măsurări de validare trebuie efectuate într-un număr suficient (de exemplu de 3-5 ori) pentru a permite luarea în considerare a variațiilor în densitatea sau geometria produsului. Marele public crede adesea că alimentele iradiate devin radioactive. Evident că acest lucru nu se întâmplă.

Dacă doza de iradiere este suficient de mare, ea distruge toate formele de viață din alimente, în special ciupercile și bacteriile, și poate degrada, de asemenea, anumite vitamine. Alimentele ionizate sunt în general preambalate. Avantajul acestui proces este că durata de viață a produselor se extinde mult, ceapa și cartofii nu încolțesc, iar fructele și legumele se păstrează timp mai îndelungat și se strică mai puțin. De exemplu, căpșunile arată proaspete la cincisprezece zile după ce au fost iradiate.

Iradierea alimentelor este strict controlată. În principiu, numai anumite produse alimentare cu destinație specifică pot fi iradiate, iar lista diferă de la țară la țară. O doză maximă de 10 kGy nu trebuie depășită în niciun caz. În plus sunt determinate praguri minime de iradiere pentru fiecare tip de aliment. În timpul procesului de iradiere se efectuează măsurări de rutină pentru a se asigura nedepășirea dozelor-limită. Pentru efectuarea acestor măsurări se plasează dozimetre în pozițiile de minim și maxim ale dozei sau într-o poziție de referință. Doza în poziția de referință trebuie să fie corelată cantitativ de dozele minimă și maximă. Poziția de referință trebuie să fie situată într-un loc convenabil din sau de pe produs, unde variațiile de doză sunt scăzute.

Măsurările de rutină ale dozei trebuie efectuate pentru fiecare lot și la intervale regulate în timpul producției. În timpul iradierii anumiți parametri ai instalației de iradiere trebuie să fie controlați și înregistrați în mod continuu. Parametrii pentru instalațiile ce utilizează radionuclizi includ viteza de transport a produsului sau timpul petrecut în zona de iradiere și indicațiile confirmând poziția corectă a sursei. Pentru instalațiile acceleratoare de particule parametrii includ viteza de transport a produsului și nivelul de energie, curentul de electroni și lărgimea de baleiere a instalației.

Procesul de iradiere duce la o pierdere substanțială sau chiar considerabilă de anumite vitamine. Riboflavina, niacina și vitamina D nu sunt foarte sensibile la iradiere, în timp ce alte vitamine pot fi ușor distruse de procesul de ionizare. Ar trebui ca fiecare să poată avea propria opțiune, cu condiția ca tratamentul de ionizare și dozele folosite să fie menționate pe ambalajul tuturor produselor din toate țările care folosesc iradierea alimentelor.

Iradierea produselor alimentare nu poate fi utilizată decât în următoarele scopuri:

a) reducerea incidenței bolilor datorate produselor alimentare prin distrugerea organismelor patogene;

b) reducerea procesului de alterare a produselor alimentare prin întârzierea sau stoparea proceselor de descompunere și prin distrugerea organismelor responsabile de aceste procese;

c) reducerea pierderilor la produsele alimentare datorate procesului prematur de maturare, germinare sau încolțire;

d) îndepărtarea din produsele alimentare a organismelor care dăunează plantelor sau produselor vegetale.

Defectoscopia metalelor

Proprietățile mecanice ale materialelor metalice sunt determinate de structura lor. Ca urmare, analiza structurii metalului este un mijloc important pentru aprecierea calității acestuia, atât pentru piesele și utilajele noi, cât și pentru evidențierea cauzelor unor cedări. Defectoscopia este o metodă de control nedistructiv care pune în evidență defectele interne fără a distruge integritatea piesei. Defectoscopia cu radiații penetrante se bazează pe proprietatea acestora de a traversa corpurile solide. Folosind un detector special (film Roentgen, ecran fluorescent, placă xerografică), se pun în evidență defectele interioare, obținându-se și o înregistrare a imaginii defectului. Controlul nedistructiv cu radiații penetrante se utilizează în special la: îmbinări sudate (pentru a descoperi incluziuni de gaze sau zgură în metalul topit, porozități, sufluri, incluziuni de zgură sau de alte materiale).

Defectoscopia Roentgen – este o metodă de analiză structurală bazată pe difracția razelor X, presupune proiectarea unui fascicul de radiații penetrate asupra piesei. Dacă în drumul fascicului de raze X, difractate de o probă cristalină, se așază o peliculă fotografică, razele X o vor impresiona și se va obține o imagine de difracție numită roentgenogramă. Aspectul acesteia este determinat de structura cristalină a probei.

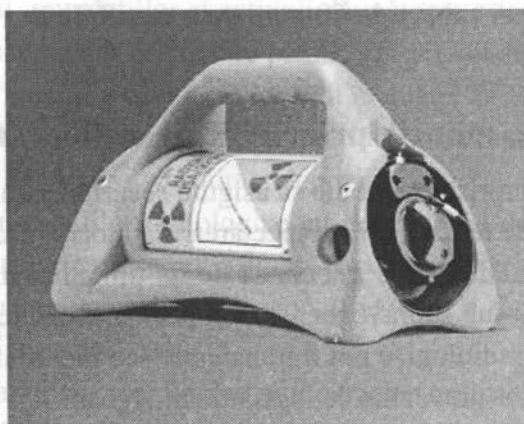


Fig.104. Defectoscop cu raze X.

Defectoscopul cu raze X – razele X sunt produse într-un tub Roentgen îmbrăcat într-o cămașă de plumb, pentru a proteja personalul de deservire contra radiațiilor periculoase sănătății (*fig. 104*). Tubul este prevăzut cu un orificiu prin care este dirijat fasciculul de sudură ce trebuie examinat, iar în spatele cusăturii se așază o placă fotografică (radiografie) sau un ecran fluorescent (radioscopie) pe care apar defectele căutate sub formă de pete. Defectoscopia cu raze X se bazează pe faptul ca razele X, având o lungime de undă foarte mică și o frecvență foarte mare, trec prin metale, fiind mai puțin sau mai mult absorbite pe drum, după cum metalul prezintă sau nu defecte interioare.

Defectoscopia cu raze gama este asemănătoare cu cea cu raze X, cu deosebirea că sursa de radiație este o substanță radioactivă naturală sau artificială. Razele gama au aceleași proprietăți ca și razele X. Instalația pentru defectoscopia gama constă dintr-un mic vas sferic sau cilindric, de plumb, având înăuntru o fiolă cu substanță radioactivă. Vasul de plumb are rol protector contra radiației; el este prevăzut cu un orificiu care atunci când aparatul nu este folosit este astupat cu un dop de plumb. Substanța radioactivă emite razele gama prin orificiul recipientului care este îndreptat spre cordonul de sudură; în spatele cusăturii se așază placa fotografică pe care apar defectele sub formă de pete.

Verificarea cu raze gama prezintă următoarele avantaje față de roentgenografie: razele gama au o putere de pătrundere mai mare, permițând astfel controlul pieselor mai groase; nu necesită instalații anexe și nici sursă de energie; este o metodă mai puțin costisitoare.

Ea prezintă însă și unele dezavantaje: necesită un timp de expunere mai mare; la piesele mai subțiri de 60 mm are o sensibilitate mai redusă față de roentgenografie.

22.3. Igiena muncii, principiile de radioprotecție

Titularul de autorizație trebuie să asigure securitatea instalațiilor radiologice și a surselor de radiații prin respectarea următoarelor cerințe:

- a) Instalațiile radiologice trebuie să fie tot timpul păstrate în condiții de protecție fizică sau sub supravegherea unei persoane calificate.
- b) Instalațiile radiologice pot fi transferate sau închiriate numai după obținerea autorizațiilor prevăzute de legislația în vigoare.
- c) Păstrarea instalațiilor radiologice se face numai în locuri corespunzător amenajate.

d) Identificarea modurilor potentiale de apariție a riscului ca instalațiile radiologice să fie pierdute sau furate și să fie asigurate măsurile de prevenire a pierderii sau furtului.

Titularul de autorizație trebuie să instituie și să mențină o procedură privind evidența, mișcarea și depozitarea instalațiilor radiologice și a surselor radioactive. Depozitarea instalațiilor radiologice cu surse închise de radiații se face numai în spații special amenajate, ferite de riscul inundării și care pot asigura instalațiile radiologice împotriva degradării mecanice și acțiunii dăunătoare a factorilor de mediu, fiind prevăzute cu:

a) sistem corespunzător de asigurare împotriva sustragerii și de alarmare. Păstrarea cheilor depozitului trebuie asigurată de responsabilul de securitatea radiologică;

b) ecrane corespunzătoare împotriva radiației gama astfel încât debitul dozei în zone accesibile, temporar, pentru alte persoane decât personalul expus profesional (singurul care are acces în depozit) să nu depășească valoarea de $7,5 \mu\text{Sv/h}$;

c) sisteme corespunzătoare de avertizare și protecție împotriva incendiului. Instalațiile radiologice nu trebuie depozitate în spații în care sunt depozitate substanțe inflamabile, corozive, explozive sau oxidante.

Ușa de acces în depozitul de surse și pereții exteriori liberi trebuie să fie marcați clar cu simbolul „Pericol de radiații” și avertismentul „Pericol – materiale radioactive”. Depozitarea temporară pe interval limitat în cazul unor lucrări cu instalații radiologice în afara incintelor special amenajate este permisă în spații care asigură instalațiile radiologice împotriva degradării mecanice, incendiului, inundațiilor și acțiunii dăunătoare a factorilor de mediu; când sunt păzite sau se află în incinte păzite, iar personalul de pază este instruit cu privire la sarcinile care îi revin; sunt încuiate, iar controlul accesului îl deține operatorul însărcinat cu executarea lucrării; accesul este marcat cu simbolul „Pericol de radiații” pe durata depozitării.

Depozitarea instalațiilor radiologice cu generatoare de radiație X se va face numai în spații în care se pot asigura condiții împotriva degradării mecanice, incendiului, inundațiilor, acțiunii dăunătoare a factorilor de mediu, furtului și utilizării neautorizate.

Evidența instalațiilor radiologice și a surselor radioactive trebuie să fie instituită prin evidența primară și operativă a tuturor instalațiilor radiologice și a surselor de radiații pe care le are în dotare.

Instalațiile de gamadefectoscopie trebuie să îndeplinească următoarele cerințe: containerul trebuie să fie dotat cu un dispozitiv de asigurare a blocării sursei radioactive, după ce aceasta a fost retrasă în container, în poziția de ecranare completă. Acest dispozitiv de asigurare trebuie să funcționeze astfel, încât să nu permită din nou eliberarea sursei fără a se efectua în mod deliberat o manevră asupra unui mecanism de eliberare; toate dispozitivele de conexiune (fitingurile) trebuie să fie dotate cu capace sau dopuri de protecție, care să fie instalate pe durata depozitării sau a transportării pentru a împiedica pătrunderea murdăriei ori a altor materiale nedorite.

În timpul lucrărilor cu instalațiile de gamadefectoscopie trebuie să fie utilizați colimatori, măști sau ecrane suplimentare, ca de exemplu bucăți de plumb, atunci când tehnica de radiografiere permite. În felul acesta se va reduce nivelul dozei de radiații în timpul expunerii, se vor obține beneficii conștând în reducerea dozei pentru expușii profesional, micșorarea dimensiunilor ariei controlate și îmbunătățirea controlului accesului în zona controlată, încasarea unei doze mai mici de către o persoană neautorizată care accidental ar pătrunde în zona controlată și o calitate superioară a imaginii radiografice.

22.4. Cerințe pentru amenajarea incintelor destinate desfășurării practicii de control nedistructiv cu radiații ionizante

Practica de control nedistructiv cu radiații ionizante, care implică utilizarea instalațiilor radiologice supuse autorizării, trebuie să se desfășoare în incinte ecranate, special amenajate. Incinta ecranată special amenajată trebuie să fie ventilată corespunzător (2 schimburi de aer/oră) și să fie realizată cu următoarele spații:

- a) incintă de iradiere dimensionată corespunzător gabaritului pieselor sau obiectelor controlate;
- b) incintă separată, adiacentă, pentru pupitrele de comandă ale instalațiilor radiologice;
- c) depozit de surse corespunzător dimensionat.

În vederea desfășurării în bune condiții a practicii de control nedistructiv cu radiații ionizante, trebuie asigurate și încăperi pentru vestiar cu grup sanitar și duș, arhivarea radiografiilor, depozit pentru filmele neexpuse, prelucrarea filmelor, interpretare și de lucru pentru operatori. Acestea trebuie să fie dimensionate corespunzător volumului de muncă și numărului de personal și să asigure un circuit funcțional corespunzător. În incinta de expunere tre-

buie asigurată dotarea cu un mijloc de comunicare care să permită, de îndată, anunțarea oricărui incident și solicitarea ajutorului.

Incintele ecranate, special amenajate trebuie astfel proiectate și utilizate, încât în timpul desfășurării practicii să asigure protecția împotriva expunerilor normale sau accidentale, prin existența mai multor bariere de securitate radiologică dispuse în adâncime (adică astfel încât cedarea unei bariere să fie compensată prin funcționarea celei care urmează).

Incintele trebuie să fie prevăzute cu sisteme de securitate (de exemplu, de blocare sau de acționare interconționată), sisteme de avertizare, sisteme de ventilație corespunzătoare (aspirație sus și evacuare jos), care să asigure 2 schimburi de aer pe oră; sisteme de iluminare adecvate, care să asigure o iluminare de 500 lămpi în zona de radiografiere; sisteme de încălzire adecvate care să asigure, pe timp de iarnă cel puțin 16°C.

Incintele vor fi proiectate astfel, încât debitul dozei să nu depășească:

- a) 15 mSv/an la locul de muncă al operatorului;
- b) 1mSv/an în zonele unde persoanele din populație pot avea acces.

Încintele în care se desfășoară practica de control nedistructiv cu radiații ionizante trebuie dotate cu următoarele sisteme de avertizare: sistem de avertizare sonoră care să avertizeze prealabil expunerii persoanele aflate în interiorul și în exteriorul incintei; sisteme distincte pentru avertizare luminoasă pe durata expunerii și sisteme de avertizare luminoasă pe acoperiș, în cazul în care există probabilitatea prezenței unor persoane în această zonă; semnul „Pericol de radiații” montat pe ușile de acces în incintă și pe pereții liberi.

Cerințe privind zonarea – incinta de expunere și depozitul de surse trebuie clasificate ca zone controlate. Zona situată împrejurul zonei controlate este considerată zona supravegheată. Zona supravegheată cuprinde toate spațiile laboratorului, cu excepția incintei de expunere și a depozitului. Zona controlată este cea delimitată și izolată la limita la care debitul de doză are valoarea maximă de 60 μ Sv/h; zona supravegheată se extinde până la limita la care debitul de doză scade la valoarea 7,5 μ Sv/h, cu condiția limitării accesului în zona supravegheată a persoanelor din populație la tranzitul cu cea mai scurtă durată posibilă. Semnele de avertizare montate la toate punctele de acces trebuie să indice clar delimitarea zonei controlate.

Urmărirea proceselor de producție

Capacitatea radiațiilor, emise în timpul dezintegrării radioactive, de a ioniza aerul, creând o conductivitate electrică, precum și capacitatea lor de a fi absorbite de anumite substanțe (în funcție de grosimea și densitatea absorban-

tului) permite utilizarea radionuclizilor în controlul proceselor tehnologice în diverse sectoare ale economiei. De exemplu, în funcție de gradul de slăbire a radiațiilor gama sau beta ușor poate fi controlată grosimea bandei de oțel, hârtie, piele etc. Dispozitivul portabil (măsurător de grosime) se instalează lângă bandă și el înregistrează toate abaterile de la mărimile necesare.

Într-o varietate de industrii se folosesc echipamentele pentru controlul automat și reglarea nivelurilor și a densității lichidelor și materialelor granulate. Indicatoarele de nivel radioactiv sunt folosite, în special, pentru a gestiona în mod automat procesul de topire caustică, de măsurare non-contact a încărcării în furnal, precum și de alarmă automată, care să permită descărcarea cuptorului, atunci când nivelul admis este atins. La unele uzine metalurgice sunt introduse regulatoare automate cu radionuclid de control al nivelului de metal lichid în turnarea continuă a oțelului.

Eficacitatea în managementul incendiilor depinde, în mare măsură, de detectarea timpurie a locului incendiului și de sistemele de alarmă în caz de incendiu. Aici, de asemenea, sunt utilizați radionuclizii.

O problemă majoră pentru industriile de textile, de hârtie, de poligrafie, de producere a peliculelor și pentru alte industrii este electricitatea statică, de exemplu, acumularea sarcinii electrice pe materiale din cauza frecării lor cu altele sau cu părți de mașini, utilaje etc. Electricitatea statică reduce calitatea produselor și uneori este o cauză a incendiilor. Pentru a elimina electricitatea statică se folosesc neutralizatori cu radionuclizi. Sursa de radiații (de obicei, plutoniu-239) este plasată vizavi de suprafața cu sarcină, precum și sarcina electrică trece, iar din cauza trecerii pe această suprafață a ionilor de semn opus formați în aer în urma ionizării cu particule alfa, emenate de plutoniu-239, are loc neutralizarea sarcinii electrice formate.

Tehnologia radiațională

Tehnologia radiațională studiază, perfecționează și dezvoltă metode, tehnici și dispozitive care utilizează radiații ionizante. Tehnici radiaționale sunt utilizate la fabricarea sau îmbunătățirea proprietăților materialelor, bunurilor de capital, precum și la soluționarea problemelor ecologice, unelor tehnologii nucleare și altor probleme. Tehnologiile radiaționale reprezintă un domeniu relativ nou. Primele procese cu folosirea radiațiilor ionizante (de sterilizare a dispozitivelor medicale) au fost introduse în industrie pe la mijlocul anilor '50, iar formarea și dezvoltarea tehnologiilor radiaționale ca un domeniu separat a apărut în ultimii 35-40 de ani.

În tehnologiile radiaționale sunt utilizate următoarele surse de radiații ionizante: surse de radiații gama – ^{60}Co și în măsură mai mică – ^{137}Cs , acceleratoare de electroni, surse de radiații beta $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, implantatori ionici, reactoare nucleare (foarte rar). În etapa actuală de dezvoltare a tehnologiilor radiaționale acceleratoarele de electroni sunt utilizate mult mai larg decât sursele de radiații gama. Acest fapt se datorează radioprotecției mai mari și de înaltă capacitate a acceleratoarelor de electroni.

Capitolul 23.

UTILIZAREA RADIAȚIILOR IONIZANTE ÎN SCOPURI ENERGETICE

23.1. Energia nucleară și competitivitatea

Costul și riscul de investiție sunt aspecte importante care trebuie luate în considerare la construcția noilor reactoare nucleare. În prezent, construcția unei noi centrale nucleare-electrice înseamnă o investiție de 2-3,5 miliarde de euro (pentru o putere de la 1000 MWe la 1600 MWe). Având în vedere obiectivele stabilite prin Protocolul de la Kyoto, în prezent există motive solide și urgente pentru ca politica publică să favorizeze tehnologiile curate.

Una dintre întrebările-cheie este dacă energia nucleară necesită o intervenție la nivel de politică publică pentru a deveni competitivă din punct de vedere economic. Investițiile în noi instalații nucleare necesită un cadru legislativ și politic stabil, dat fiind intervalul mare de timp între investiția inițială și înregistrarea primelor beneficii substanțiale. Întrucât piețele liberalizate nu pot garanta stabilitatea pe termen lung a prețurilor, AIE observă că pentru ca sectorul privat să investească în proiecte nucleare, autoritățile vor fi probabil nevoite să ia măsuri pentru reducerea riscului de investiție.

23.2. Caracteristica reactoarelor utilizate și a procesului tehnologic de producere a energiei electrice

Reactoarele nucleare au fost folosite pentru producerea energiei încă din anii '50.

Reactorul nuclear este un sistem controlat în care se produce în mod continuu fisiunea nucleară, printr-o reacție în lanț autoîntreținută cu ajutorul neutronilor. Orice reactor nuclear are ca scop principal realizarea creșterii numărului de neutroni, în mod controlat, menținerea la nivelul corespunzător a degajării de energie nucleară, printr-o reacție în lanț. Pentru a preveni răspândirea substanțelor radioactive în cazul unei avarii a reactoru-

lui, acesta este închis în întregime într-un container de oțel, apoi în clădiri de beton armat.

Principalele componente ale unui reactor nuclear sunt: materialul fisi-onabil; moderatorul; fluidul de răcire; barele de control; reflectorul; protecția – realizarea prin înconjurarea reactorului cu un strat gros de beton, pentru atenuarea scăpărilor de radiație gama din miezul reactorului.

Există, practic, două tipuri de reactori: reactori termici și reactori rapizi. În reactorii termici frecvent utilizați se folosește uraniul, care este alcătuit din nucleele a doi izotopi: uraniu-235 (0,7%) și uraniu-238 (99,3%).

Clasificarea reactorilor nucleari

a) După energia neutronilor care participă la realizarea fisiunii în lanț: *termici și rapizi*.

b) După scop: *de cercetare, de încercări de materiale, energetici, pentru propulsia navelor sau cosmonauților etc.*

c) După modul în care se realizează zona activă: *reactori eterogeni* (combustibilul este dispus în rețeaua moderatorului) și *reactori omogeni* (combustibilul și moderatorul formează un amestec omogen).

d) După tipul de moderator: *cu apă obișnuită, cu apă grea, cu grafit sau cu beriliu*.

e) După felul și natura combustibilului: *cu combustibil îmbogățit sau natural; cu uraniu sau plutoniu; metalic, oxid, înglobat în material ceramic*.

f) După starea de criticitate și puterea degajată: *subcritic, critic de putere zero* (puterea degajată este mică, încât nu are nevoie de agent de răcire) sau *critic și cu putere diferită de zero*.

g) După modul în care se produc noile materiale: *convertor sau reproductor*.

Centrala nucleară

O centrală nucleară reprezintă o instalație complexă de producere a energiei electrice din energia termică obținută prin inițierea și întreținerea unei reacții nucleare de fisiune controlată în lanț, proces realizat într-un reactor nuclear.

Într-o centrală nucleară, reactorul îndeplinește aceeași funcție ca un cazan într-o centrală pe cărbune, gaz natural sau păcură. Căldura, indiferent că provine de la un reactor nuclear sau de la un cazan, este necesară pentru a transforma apa în abur. Aburul astfel obținut, rotește paletele unei turbine ce pune în mișcare generatorul producător de electricitate.

În cazul unui reactor nuclear, combustibilul folosit conține uraniu. Căldura este produsă în reactor prin scindarea atomilor de uraniu. Atunci când un atom este scindat în urma ciocnirii cu un neutron aflat în mișcare, are loc o eliberare semnificativă de energie și a altor doi-trei neutroni noi. Aceasta este o reacție nucleară denumită reacție de fisiune. Dacă neutronii eliberați în urma fisiunii ar putea fi încetiniți sau moderați, probabilitatea unei noi ciocniri atomice generatoare de energie termică ar crește. În felul acesta, avem de-a face cu o reacție de fisiune în lanț, care multiplică energia ce se eliberează. Se creează astfel suficientă căldură, care transformată în abur poate antrena paletele unei turbine.

În principiu, un reactor nuclear se compune dintr-o zonă centrală, denumită zonă activă, în care are loc reacția de fisiune în lanț, un mediu de răcire, care transferă căldura degajată în zona activă la generatorii de abur, și moderatorul, care permite întreținerea reacțiilor în lanț prin reducerea vitezei neutronilor.

În lume există diverse tipuri de reactori nucleari, toți funcționând pe baza aceluiași principiu: producerea căldurii prin fisiunea atomilor.

Ceea ce diferențiază aceste tipuri de reactori nucleari este modul de combinare a celor trei componente de bază, adică filierele nucleare.

Tipul de reactor folosit în Canada se numește CANDU (**CAN**ada **Deu**terium **U**ranium), nume ce rezumă trei din caracteristicile principale ale reactorului: sistemul este canadian, el folosește apa grea (deuterium) ca moderator și combustibilul utilizat este uraniul natural (*fig.105*).

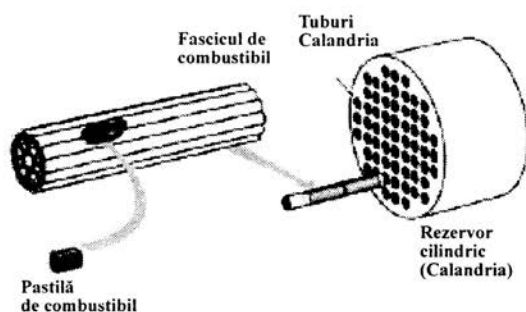


Fig. 105. Reactor CANDU.

Zona activă (miezul) a unui reactor de tip CANDU se află într-un rezervor cilindric orizontal numit Calandria, prevăzut la capete cu două protecții de capăt formate din plăci de oțel. Vasul Calandria și protecțiile de capăt sunt străbătute de 380 tuburi Calandria, în care sunt amplasate 380 de tuburi mai

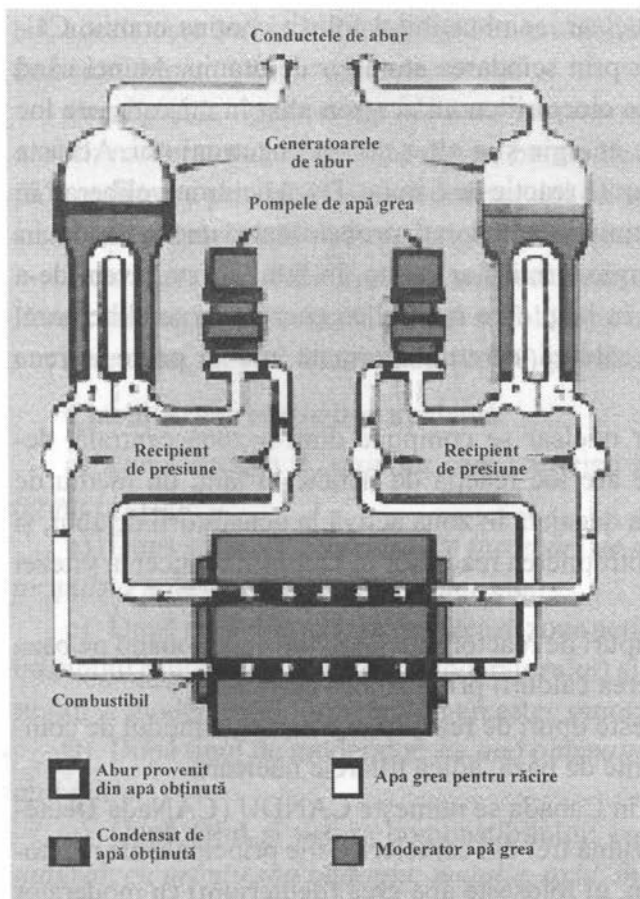


Fig. 106. Schema reactorului CANDU.

căldura generată de reacția nucleară în cazul reactorilor CANDU, este utilizată apa grea pompată prin tuburile de presiune ce conțin fascicule de combustibil. Încălzită, apa grea este transportată la generatorii de abur unde cedează căldura apei obținute, obținându-se aburul, iar odată răcită, este recirculată înapoi în reactor. Aburul este apoi transportat la turbina care rotește generatorul ce produce energia electrică. În felul acesta circuitul reactorului nuclear, numit și circuit primar, este separat de circuitul destinat producerii energiei electrice denumit circuit secundar. Rotația turbină-generator transformă energia mecanică în energie electrică. Aceasta generează curent electric, în același mod ca un dinam de bicicletă.

În figura 106 este prezentată schema simplificată a unui reactor de tip CANDU, iar în figura 107 – schema simplificată a unei centrale nucleare echipată cu reactor de tip CANDU. Fasciculele de combustibil sunt înlocuite,

mici, denumite tuburi de presiune. În aceste tuburi de presiune sunt introduse fascicule de combustibil, cântărind fiecare cca 25 kg, în care uraniul natural se prezintă sub forma unor pastile compactizate și sintetizate (fig.106). Zona activă a reactorului nuclear conține fascicule de combustibil imersate în apa sistemului primar de răcire, închisă într-un vas de oțel de aproximativ 5 metri în diametru și 10 metri înălțime.

Moderatorul (apa grea), fără de care reacția nucleară nu poate avea loc, înconjoară tuburile de presiune. Ca agent de răcire, ce preia

pe măsură ce se consumă, cu fascicule de combustibil proaspăt. Operația de extragere a combustibilului consumat și realimentarea cu combustibil proaspăt se face concomitent, cu reactorul în funcțiune, cu ajutorul a două mașini de încărcare-descărcare (MID).

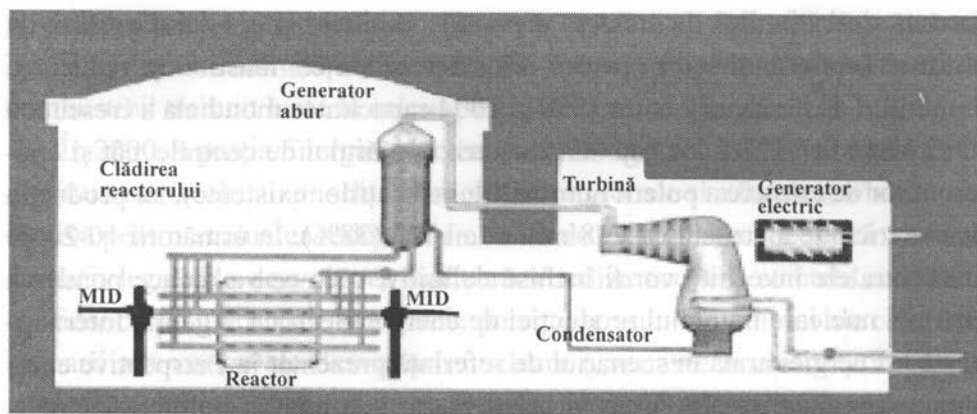


Fig. 107. Schema simplificată a unei centrale nucleare.

Pentru a rezuma, reacția nucleară generează căldură → încălzește apa → generează abur → face turbina să se învâртеască → rotația turbinei antrenează un generator → generatorul convertește mișcarea de rotație în electricitate → electricitatea e transmisă prin liniile de înaltă tensiune și distribuită cetățenilor privați și companiilor.

Realimentarea, ca și majoritatea operațiilor de rutină în cadrul centralei nucleare, este controlată prin calculator. Un al doilea calculator este gata să intre în funcțiune în caz de defecțiune a primului calculator.

Nivelul de putere al reactorului este menținut sub control prin intermediul unor bare de control. De asemenea, întregul proces de producție, precum și întregul reactor sunt protejate prin intermediul unor sisteme de siguranță; un rol important în acest sens îl au cele două sisteme de oprire în caz de accident.

23.3. Centrale nucleare din UE și din lume

În prezent există 443 de reactoare nucleare comerciale, care funcționează în 31 de țări din lume, cu o putere totală de peste 368 GWe. Acestea furnizează 15% din electricitatea mondială. În plus, 56 de țări exploatează un număr total de 284 de reactoare de cercetare în scopuri științifice. Alte 220 de reactoare nucleare sunt utilizate pentru propulsarea navelor militare și a altor tipuri de vase. 28 de reactoare nucleare-electrice se află în construcție în

întreaga lume și încă 35 fac obiectul unor proiecte ferme, acestea echivalând cu 6% și respectiv 10% din capacitatea existentă.

Deși numărul centralelor nucleare construite după anul 1980 este scăzut, cele care se află în funcțiune produc cu până la 20% mai multă electricitate datorită operațiunilor de creștere a puterii nominale și nivelului crescut de utilizare (opriri mai scurte pentru reîncărcarea cu combustibil și reducerea numărului de incidente). Între 1990 și 2004 capacitatea mondială a crescut cu 39 GWe (adică 12%, datorită atât creșterii numărului de centrale, cât și operațiunilor de creștere a puterii nominale a instalațiilor existente), iar producția de electricitate a crescut cu 718 miliarde kWh (38%). În următorii 10-20 de ani centralele învechite vor fi închise definitiv, ceea ce va reduce ponderea energiei nucleare în totalul producției de energie electrică. Agenția Internațională a Energiei arată în scenariul de referință prezentat în Perspective energetice mondiale din 2006 că, în cazul în care se mențin politicile actuale, ponderea energiei nucleare va scădea de la 15% în prezent la mai puțin de 8% în a. 2030.

În UE există 152 de reactoare nucleare-electrice, care se află în exploatare în 15 state membre. Media de vârstă a centralelor nucleare-electrice se apropie de 25 de ani. În Franța, care deține cel mai mare număr de reactoare nucleare (59) ce furnizează aproape 80% din energia electrică, și în Lituania, unde o singură centrală nucleară furnizează 70% din producția de electricitate, vârsta medie a reactoarelor este de aproximativ 20 de ani. În Regatul Unit al Marii Britanii cele 23 de centrale nucleare au o vârstă medie de aproape 30 de ani, în timp ce în Germania vârsta medie a celor 17 centrale aflate în funcțiune este de 25 de ani.

23.4. Energia nucleară și schimbările climatice

Politica privind clima se concentrează în primul rând pe reducerea în termen scurt a emisiilor, în scopul respectării obiectivelor stabilite în Protocolul de la Kyoto. Electricitatea generată pe cale nucleară garantează provizii mari la sarcina de bază, acoperind necesitățile industriilor mari consumatoare de energie, precum și cerințele zilnice ale gospodăriilor, cu emisii reduse. Din 1973, centralele nucleare-electrice au satisfăcut 38% din cererea mondială de electricitate, aflată în creștere. Presupunând că, în lipsa capacității nucleare-electrice, aceasta ar fi fost înlocuită de centrale pe bază de combustibili fosili, energia nucleară a contribuit în mod semnificativ la limitarea emisiilor de

CO₂, principalul gaz cu efect de seră-37. Producerea unui milion de kilowați-oră de electricitate pe bază de cărbune eliberează în atmosferă 230 tone metrice (tm) de carbon, pe bază de petrol – 190 tone metrice și pe bază de gaze naturale – 150 tone metrice. În condiții normale de funcționare, o centrală nucleare-electrică generează același număr de kilowați fără emisii de carbon. Emisiile datorate activităților de extracție și fabricare pentru diferite tipuri de combustibil nu sunt luate în calcul pentru această comparație.

În 2000, Agenția Energiei Nucleare a investigat rolul energiei nucleare în diminuarea riscului unor schimbări climatice globale și a furnizat o bază cantitativă pentru evaluarea reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră în diverse scenarii legate de dezvoltarea nucleară. Analiza acoperă efectele economice, financiare, industriale și efectele potențiale asupra mediului ale celor trei scenarii alternative ale dezvoltării nucleare („variante nucleare”): creșterea nucleară continuă, abandonul progresiv al energiei nucleare sau o perioadă de stagnare urmată de o relansare a programelor nucleare. Fiecare dintre cele trei variante ar implica provocări pentru sectorul nuclear, însă toate ar fi fezabile din punctul de vedere al ritmului de construcție, al finanțării, al alegerii amplasamentului, al cerințelor privind terenul și al resurselor naturale. AEN a concluzionat că energia nucleară este o opțiune disponibilă care permite diminuarea riscurilor privind schimbările climatice globale și că menținerea acestei opțiuni ar promova, de asemenea, dezvoltarea altor aplicații decât producerea energiei electrice, cum sunt producerea de căldură, apă potabilă și hidrogen, sporind astfel contribuția energiei nucleare la reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră. În consecință, rolul energiei nucleare ar trebui să fie în continuare luat în calcul în cadrul discuțiilor privind Schema UE de comercializare a certificatelor de emisii de gaze cu efect de seră.

Energia nucleară este, prin urmare, una dintre opțiunile disponibile pentru reducerea emisiilor de CO₂. Energia nucleară este în prezent cea mai mare sursă de energie fără emisii de CO₂ din Europa și face parte din scenariul propus de Comisie pentru reducerea emisiilor de carbon. Studiul AIE Perspective energetice mondiale, 2006 menționează, în cazul UE, „prelungirea duratei de viață utilă a centralelor nucleare” (evitarea a 148 tm de emisii de CO₂), însoțită de utilizarea din ce în ce mai largă a surselor regenerabile pentru producerea de energie (evitarea a 141 tm de emisii de CO₂). Menținerea opțiunii nucleare pentru realizarea acestui potențial va necesita luarea de decizii și măsuri de către autorități și sectorul industrial.

23.5. Radiațiile de la centralele nucleare

Pot apărea întrebări privind doza suplimentară pe care am primi-o dacă am locui în vecinătatea unei centrale nucleare. Există opinii potrivit cărora creșterile fluxului de radiații în spațiul din jurul reactorului sunt periculoase pentru om, deoarece măresc riscul apariției bolilor de radiație. Realitatea, însă, a dovedit că nivelul radiației în cazul unei centrale nucleare este comparabil cu cel detectabil în centralele clasice și până în prezent nu a putut fi pusă în evidență apariția vreunei boli de radiație în cazul centralelor clasice.

Limita de proiectare pentru doza de radiație anuală maximă la limita perimetrului unei centrale nucleare este 0,05 mSv. În realitate doza este mult mai mică: circa 0,02 mSv.

23.6. Igiena muncii, principiile de radioprotecție la stațiile nucleare-electrice

În centralele nucleare-electrice sunt luate multe precauții pentru ca populația civilă și personalul centralei să fie protejate de efectele radiațiilor ionizante. Se iau precauții în proiectarea centralelor (construcția sistemelor de anvelopare, stabilirea caracteristicilor de securitate, proiectarea reactorilor cu autostabilizarea etc.), precum și în operarea lor (alarme, proceduri de oprire de urgență, dispozitive de securitate, pregătirea personalului, echipament de protecție, dozimetre pentru personal).

Pentru asigurarea securității centralelor și a populației din vecinătate sunt prevăzute următoarele precauțiuni:

Securitatea amplasamentului. La alegerea unui amplasament pentru o centrală nucleare-electrică sunt luați în considerare câteva sute de factori. Aceștia includ riscul seismic (cutremur), riscul de inundații, clima, consecințele unui accident asupra populației din vecinătate (CNE sunt construite departe, și nu pe direcția vântului), impactul asupra florei, faunei și ecosistemelor locale.

Trei bariere succesive. Combustibilul nuclear este confinat de trei bariere succesive impenetrabile. Prima barieră este teaca metalică ce înconjoară combustibilul de uraniu, iar a doua este peretele din oțel al vasului reactorului și al sistemului primar de răcire (aproximativ de 20 cm grosime). Vasul reactorului și sistemul primar de răcire sunt incluse în al treilea element de izolare – pereții din beton armat cu o grosime de circa doi metri ai clădirii reactorului. Centralei de la Cernobîl i-a lipsit a treia barieră. Prezența ei ar fi putut evita eliberarea radioactivității ce a urmat topirii zonei active a reactorului.

Barele de control. Sunt compuse din elemente absorbante de neutroni (bor sau cadmiu) și pot opri în orice moment reacția nucleară în lanț. Ele sunt suspendate deasupra zonei active a reactorului și sunt coborâte, fiind lăsate pur și simplu să cadă. Când sunt eliberate, ele cad datorită gravitației și întrerup imediat reacția nucleară. Barele de control funcționează, chiar dacă toate sistemele de control sunt distruse și există o pierdere totală a alimentării electrice din centrală.

Oprirea de urgență. Reacția nucleară poate fi oprită în orice moment dacă se detectează condiții anormale (cum sunt scurgerile radioactive, creșterea anormală a temperaturii din reactor). Procedura de oprire se lansează automat cu ajutorul dispozitivelor de securitate care acționează fără intervenția operatorilor din camera de comandă.

Protecția împotriva erorilor umane. Dispozitivele automate monitorizează parametri importanți cum sunt intensitatea reacției nucleare sau temperatura și presiunea din zona activă a reactorului. Dacă acești parametri depășesc una din limitele stabilite, barele de control sunt eliberate automat și reacția nucleară e oprită fără intervenție umană.

Protecția împotriva erorilor mecanice. În cazul unui defect mecanic, electronic sau privind calculatoarele, mecanismele automate de alarmă și securitate avertizează operatorii. Chiar în cazul unui scenariu foarte improbabil, când o anumită alarmă sau dispozitiv de securitate nu lucrează corect, operatorii pot opri manual, în orice moment, reactorul apăsând butonul de urgență.

Evacuarea căldurii. Sistemul de răcire supradimensionat (și cu rezervă) evacuează căldura reziduală chiar dacă există o pană totală a sistemului de alimentare electrică a unității.

Îmbrăcămintea specială. Când un reactor este în funcțiune, radioactivitatea din clădirea reactorului este în mod normal foarte scăzută. Totuși, pentru a preveni orice risc posibil de contaminare, activitățile care trebuie executate în interiorul clădirii reactorului sunt în marea majoritate automate sau realizate de roboți. Personalul care intră în clădirea reactorului poartă îmbrăcăminte de protecție și dozimetre speciale „badge” ce înregistrează radiația la care a fost expus.

Monitorizarea securității în timpul operării. În timp ce funcționează unitatea nucleară, un panou cu instrumente din camera de comandă afișează permanent toate informațiile relevante privind condițiile de securitate.

Prioritatea securității și pregătirii personalului. Securitatea centralei, a personalului și publicului au întotdeauna prioritate față de necesitatea de a produce electricitate. Personalul este pregătit având în vedere acest principiu.

Învățând din experiență. Fiecare situație anormală sau incident, indiferent cât de minore, sunt atent studiate și analizate pentru a determina cauzele și a trage concluziile privind îmbunătățirea echipamentului, proiectarea viitoarelor centrale, pregătirea personalului, interfața om/mașină și securitatea centralei.

Riscul de accident. Deși accidentele nucleare sunt improbabile, ele sunt totuși posibile. Prin urmare, într-o asemenea eventualitate, dacă ea se produce, trebuie să încercăm să minimizăm consecințele.

Controlul radioactivității: Radioactivitatea din interiorul centralei și din zona înconjurătoare este testată cu regularitate (pentru protecția personalului centralei, a publicului și a mediului). Pe timpul funcționării centralei, înregistrările, care privesc populația din vecinătate și mediul, sunt permanente și se află sub controlul unei organizații independente de compania de electricitate.

Fumatul este interzis. Într-o unitate nucleară o țigară stinsă parțial poate declanșa un incendiu, consecințele acestuia putând fi foarte severe. Prin urmare, este logic ca fumatul într-o centrală nucleareo-electrică să fie interzis.

Capitolul 24.

TRANSPORTAREA SURSELOR ȘI A DEȘEURILOR RADIOACTIVE

Transportul cuprinde toate operațiile și condițiile asociate și implicate în mișcarea materialului radioactiv. Acestea includ: proiectarea, fabricarea, întreținerea și reperarea ambalajelor, pregătirea, manipularea, încărcarea, expedierea, transportul, depozitarea de tranzit, descărcarea și recepționarea coletelor și a materialelor radioactive la destinația finală. În cazul dat este necesar de a stabili măsurile pentru asigurarea protecției și securității transporturilor de materiale radioactive în scopul menținerii sub limitele admise a expunerii la radiații a persoanelor, bunurilor și mediului ambiant în timpul și ca urmare a operațiunilor auxiliare pe care le presupune transportul acestora.

Această protecție este asigurată prin îndeplinirea următoarelor cerințe:

- d) izolarea conținutului radioactiv;
- e) controlul intensității radiației exterioare;
- f) prevenirea criticității;
- g) prevenirea deteriorării datorate acțiunii căldurii.

Aceste cerințe sunt satisfăcute în primul rând prin aplicarea unei abordări graduale asupra limitelor de conținut pentru colete și mijloacele de transport și asupra standardelor de performanță pentru modelele de colete în funcție de riscul prezentat de conținutul radioactiv. În al doilea rând, aceste cerințe sunt satisfăcute prin impunerea unor cerințe referitoare la proiectarea și manipula-rea coletelor și la întreținerea ambalajelor, incluzând considerații referitoare la natura conținutului radioactiv. În sfârșit, aceste cerințe sunt satisfăcute prin impunerea controalelor administrative, inclusiv prin aprobările acordate de autoritățile de reglementare competente.

Normarea cerințelor pentru transportare se aplică transportului materia-lelor radioactive prin toate modurile de transport: pe uscat, pe apă și în aer și care implică materiale radioactive, inclusiv transportul ocazionat de utilizarea materialelor radioactive.

Pentru transportarea surselor și materialelor radioactive se folosesc con-tainere speciale. Containerul de transport reprezintă un echipament de trans-port destinat facilitării transportului bunurilor ambalate sau neambalate, cu unul sau mai multe mijloace de transport, fără a se mai efectua operații inter-mediare, de încărcare-descărcare a acestora.

Acesta trebuie să fie un echipament cu închidere sigură, suficient de rigid și rezistent pentru a face față utilizării repetate și care trebuie să fie prevăzut cu diverse facilități pentru manipulare, specifice transferului între diversele mijloace de transport utilizate (*fig. 108, fig. 109*). Un container mic de trans-port este acela, care are toate dimensiunile exterioare mai mici de 1,5m sau un volum interior mai mic de 3m³. Oricare alt container de transport este considerat ca fiind un container mare de transport.

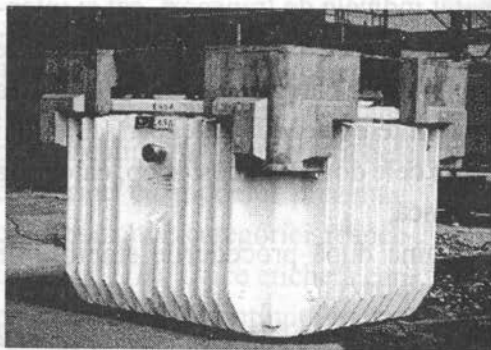


Fig. 108. Container tip B.



Fig. 109. Container tip A.

Prin ambalaj se înțelege ansamblul de elemente componente necesare închiderii depline a conținutului radioactiv. În particular, ambalajul poate consta din unul sau mai mulți recipienți, materiale absorbante, elemente constructive de distanțare, materiale de ecranare contra radiațiilor, echipamente auxiliare pentru umplere, golire, ventilare și protecție la presiune, dispozitive de răcire, de amortizare a șocurilor mecanice, dispozitive de fixare și ușurare a manipulării, de izolare termică și dispozitive de întreținere care sunt parte integrantă a coletului. Ambalajul poate fi o cutie, un butoi sau un recipient similar, dar poate fi, de asemenea, un container de transport, o cisternă sau un container intermediar de transport în vrac.

Categoriile și etichetarea surselor de radiații ionizante

Prin colet se înțelege ambalajul împreună cu conținutul său radioactiv, așa cum este prezentat de expeditor pentru transport. Tipurile de colete sunt:

- a) Colet exceptat
- b) Colet industrial tip 1 (C1-1)
- c) Colet industrial tip 2 (C1-2)
- d) Colet industrial tip 3 (C1-3)
- e) Colet tip A
- f) Colet tip B (U)
- g) Colet tip B (M)
- h) Colet tip C

Coletele sau ambalajele exterioare se clasifică în una din următoarele categorii: I-ALB, II-GALBEN sau III-GALBEN, în conformitate cu condițiile specificate în *tabelul 37* și cu următoarele cerințe:

a) pentru determinarea categoriei corespunzătoare a unui colet sau ambalaj exterior se vor lua în considerare atât indicele de transport, cât și intensitatea maximă a radiațiilor la suprafața exterioară. În cazul în care indicele de transport satisface cerințele pentru o anumită categorie, însă intensitatea radiațiilor la suprafața acestuia satisface cerințele unei alte categorii, coletului i se va atribui categoria cea mai mare dintre cele două. În acest scop, categoria I-ALB va fi considerată ca fiind cea mai mică;

b) indicele de transport se va determina după procedurile stabilite de AIEA;

c) dacă intensitatea maximă a radiațiilor pe suprafață este mai mare de 2 mSv/h, coletul sau ambalajul exterior trebuie să fie transportat în regim de utilizare exclusivă;

d) un colet transportat în aranjament special va fi considerat de categoria III-GALBEN;

e) un ambalaj exterior care conține colete transportate în aranjament special va fi considerat de categoria III-GALBEN.

Tabelul 37

Categoriile de colete și ambalaje exterioare

Condiții		Categoria
Indice de transport	Intensitatea maximă a radiațiilor în orice punct de pe suprafața exterioară	
0 ^a	Nu mai mare de 0,005 mSv/h	I-ALB
Mai mare de 0, dar nu mai mare decât 1 ^a	Mai mare de 0,005 mSv/h, dar mai mic de 0,5 mSv/h	II-GALBEN
Mai mare de 1, dar nu mai mare decât 10	Mai mare de 0,5 mSv/h, dar mai mic de 2 mSv/h	III-GALBEN
Mai mare de 10	Mai mare de 2 mSv/h, dar mai mic de 10 mSv/h	III-GALBEN ^b

^a) Dacă IT nu este mai mare decât 0,05, valoarea sa se va considera ca fiind egală cu zero;

^b) Va fi transportat în regim de utilizare exclusivă.

Fiecare colet trebuie să aibă marcat clar și durabil fie denumirea expeditorului, fie cea a destinatarului, fie ambele. Fiecare colet, în afara coletelor expediate, va avea marcat clar și durabil pe exteriorul ambalajului numărul Organizației Națiunilor Unite precedat de literele „UN” precum și numele oficial de expediere. Fiecare colet având masa brută mai mare de 50 kg trebuie să aibă marcată clar și durabil pe fața exterioară a ambalajului masa sa brută permisă.

Etichetarea. Cu excepția containerelor mari de transport și a cisternelor, fiecare colet, ambalaj exterior și container de transport trebuie să poarte etichete conforme cu modelul prezentat, corespunzător categoriei respective (fig. 110). Orice etichetă care nu corespunde conținutului trebuie să fie îndepărtată sau acoperită. Etichetele conform modele-

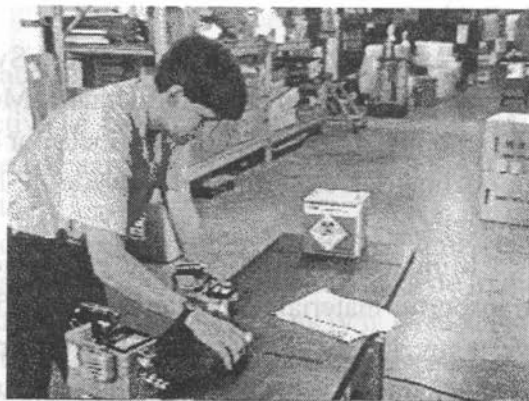


Fig.110. Proces de etichetare.

lor se fixează pe două părți opuse ale exteriorului coletului sau ambalajului exterior, ori pe cele patru părți exterioare ale unui container de transport sau ale unei cisterne. Etichetele nu trebuie să acopere marcajele speciale.

Containerele mari de transport în care se transportă colete, altele decât coletele exceptate și cisternele, trebuie să poarte patru placarde. Placardele vor fi fixate într-o poziție verticală pe fiecare perete lateral și pe pereții din față, și din spate ai containerului mare de transport sau ai cisternei.

Radioprotecția personalului

În timpul transportării, protecția și securitatea trebuie să fie optimizate în scopul menținerii dozelor individuale, a numărului persoanelor expuse și a probabilității de iradiere la valori cât mai scăzute rațional posibil, luându-se în considerare factorii economici și sociali, și respectându-se limitele relevante de doză prevăzute de Normele Fundamentale de Radioprotecție. Se va avea în vedere corelarea activității de transport cu alte activități.

Personalul implicat în transport trebuie să fie pregătit corespunzător în ceea ce privește evitarea pericolelor de iradiere pe care le implică activitățile respective, cât și în ceea ce privește măsurile pentru micșorarea expunerii sale sau a altor persoane ce ar putea avea de suferit.

Pentru persoanele expuse profesional din domeniul transportului de materiale radioactive, unde se estimează că doza efectivă:

a) este foarte puțin probabil să depășească 1 mSv într-un an, nu se cer adoptarea de proceduri speciale de lucru, un control dozimetric detaliat, programe de evaluare a dozelor sau ținerea evidenței dozelor individuale;

b) este probabil să fie cuprinsă între 1 și 6 mSv într-un an, trebuie să se introducă un program de evaluare a dozelor prin controlul radiometric și dozimetric al locurilor de muncă respective sau prin monitorizarea dozimetrică individuală;

c) este probabil să depășească 6 mSv într-un an, trebuie să se introducă monitorizarea dozimetrică individuală. Monitorizarea dozimetrică individuală și monitorizarea radiologică a locurilor de muncă va fi însoțită de o evidență dozimetrică conformă cu prevederile Normelor Fundamentale de Radioprotecție.

Mijloacele de transport sau echipamentul utilizat în mod curent pentru transportul materialelor radioactive vor fi periodic verificate în ceea ce privește nivelul contaminării radioactive. Frecvența unor astfel de verificări va fi legată direct de probabilitatea apariției unor contaminări radioactive, cât și de volumul transporturilor.

STOCAREA SURSELOR ȘI A DEȘEURILOR RADIOACTIVE

25.1. Deșeurile radioactive

Deșeurile radioactive sunt materiale neutilizabile, provenite din activități nucleare, cu concentrații radioactive mai mari decât limitele permise pentru eliminare în mediul ambiant. Având în vedere că sunt materiale radioactive, aceste deșeuri trebuie gestionate, manevrate și tratate cu toate măsurile de securitate nucleară, de radioprotecție și administrative specifice (fig. 111).



Fig. 111. Container cu deșeuri radioactive.

Deșeurile radioactive pot proveni de la obiective sau unități nucleare, autorizate pentru a desfășura activități nucleare, precum: centrale nucleare electrice, reactori de cercetare, exploatarea miniere, unități nucleare din industrie, din spitale, universități, societăți comerciale, din aplicații ale radiațiilor în condiții de exploatare normală sau accidente.

Deșeurile slab active reprezintă aproape 90% din volumul total de deșeuri radioactive produse în lume, deșeurile mediu active reprezintă 10%, iar deșeurile înalt active cca 0,1%, dar ele concentrează 95% din radioactivitatea totală. Cantitatea totală de combustibil ars rezultat din exploatarea tuturor centralelor nucleare din lume este de cca 14 000 tone pe an. Cca $\frac{2}{3}$ din el este tratat ca deșeu radioactiv, iar restul este reprocessat pentru a recupera materialul radioactiv.

Clasificarea deșeurilor radioactive

Clasificarea deșeurilor radioactive se face în funcție de conținutul radioactiv și de debitul expunerii, starea de agregare și modul de tratare. Astfel, deșeurile radioactive pot fi împărțite în:

- deșeuri radioactive de joasă activitate, care au activitatea volumică cuprinsă între conținutul maxim admis și 10^7 Bq/m³, debitul dozei de iradiere la peretele ambalajului de transfer nu depășește 2 mGy/h. Colectarea, transportul și tratarea se exercită fără utilaje ecranate. Aceste deșeuri sunt constituite din hârtie, îmbrăcăminte, echipament de laborator, utilizate în locurile unde se manipulează materiale radioactive;

- deșeuri radioactive de activitate medie, cu activitatea volumică cuprinsă între 10^7 Bq/m³ și 10^{14} Bq/m³, iar debitul dozei de iradiere la peretele ambalajului depășește 2 mGy/h. Colectarea, transportul și tratarea se face cu mijloace de lucru ecranate, telecomandate sau în incinte cu acces limitat de timp.

Deșeurile din această categorie sunt constituite din rășini schimbătoare de ioni sau alte materiale folosite pentru reținerea gazelor și lichidelor înainte de a fi deversate în mediu, măturile care se acumulează în bazinele de „răcire”, unde se stochează combustibilul nuclear uzat cu radioactivitate foarte mare, înainte de reprocesare;

- deșeurile radioactive cu activitate înaltă au o activitate specifică mai mare de 10^{14} Bq/m³, iar emisia de radiații produce încălzirea lor, ceea ce necesită condiții speciale de colectare, transport și tratare. Sunt constituite din deșeurile rezultate după reprocesarea combustibilului nuclear ars, fiind formate din radionuclizii de fisiune, activare și din elemente radioactive din grupa actinidelor.

Termenul de deșeuri radioactive cu activitate înaltă se referă la lichidul produs când se reprocesează combustibilul uzat. În țările, care nu s-au angajat în reprocesare, combustibilul însuși este considerat ca deșeu cu activitate înaltă.

În funcție de starea de agregare, deșeurile radioactive se clasifică în solide (combustibile, necombustibile, speciale), lichide (diluabile, precipitabile, evaporabile, speciale) și gazoase (diluabile, precipitabile, evaporabile, speciale).

Clasificarea generală a deșeurilor radioactive se referă strict la cerințele privind modul de asigurare a izolării de biosferă la depozitarea definitivă a deșeurilor radioactive.

Conform clasificării generale, deșeurile radioactive se împart în:

- a) deșeuri exceptate;
- b) deșeuri de tranziție;
- c) deșeuri de activitate foarte joasă;
- d) deșeuri de activitate joasă și medie de viață scurtă;
- e) deșeuri de activitate joasă și medie de viață lungă;
- f) deșeuri de activitate înaltă.

Cerințele igienice privind amplasarea și stocarea deșeurilor radioactive

În evaluarea securității pentru amplasarea depozitului definitiv trebuie să se țină seama de prezența în zonă a resurselor naturale, a căror viitoare exploatare sau exploatare ar putea avea efecte negative asupra capacității de reținere a depozitului definitiv.

Sistemul de depozitare a deșeurilor trebuie să asigure izolarea deșeurilor și să limiteze eliberările de radionuclizi, astfel încât efectele potențiale ale depozitării deșeurilor asupra oamenilor și mediului să fie în limitele stabilite de organele de reglementare. Acest sistem de depozitare trebuie să întrunească criteriile de securitate, luând în considerare caracteristicile deșeurilor, controlul instituțional, barierele naturale și ingineresti asociate amplasamentului.

În evaluările de securitate, dar și în conceptul depozitului trebuie luate în considerare cel puțin următoarele caracteristici ale amplasamentului: geologia, hidrogeologia, geochimia, tectonica și seismicitatea, procesele de suprafață, meteorologia, climatul amplasamentului și impactul activităților umane pe amplasament.

Geologia. Amplasamentul selectat trebuie să se afle într-o zonă ale cărei caracteristici geologice conduc la satisfacerea criteriilor de securitate radiologică și contribuie la stabilitatea sistemului de depozitare.

Hidrogeologia. Un amplasament se consideră acceptabil din punctul de vedere al hidrogeologiei atunci când caracteristicile lui limitează transferul radionuclizilor din depozit în mediul ambiant. Depozitul trebuie să fie amplasat astfel încât să prevină contaminarea resurselor de apă freatică. Selectarea amplasamentului trebuie să țină seama de conceptul depozitului și de viitoarele utilizări posibile ale resurselor de apă freatică.

Geochimia. Caracteristicile geochimice ale apei freactice, precum și mediul geologic trebuie să limiteze migrarea radionuclizilor din depozit. Caracteristicile geochimice ale apei freactice, precum și mediul geologic nu trebuie să afecteze durata estimată de viață a barierele ingineresti.

Tectonica și seismicitatea. Amplasamentul unui depozit trebuie selectat într-o zonă în care nu se preconizează să aibă loc evenimente și procese semnificative, cum ar fi falierea, activitatea seismică și activitatea vulcanică, la o intensitate care să afecteze capacitatea de izolare a depozitului.

Procese de suprafață. Amplasamentul unui depozit trebuie selectat astfel încât frecvența și intensitatea proceselor care pot afecta stabilitatea solului, cum ar fi inundațiile, eroziunile, alunecările de teren sau efectul agenților atmosferici, să nu afecteze semnificativ capacitatea sistemului de depozitare

de a izola deșeurile radioactive. Amplasamentul trebuie să aibă capacitatea de drenare și caracteristici topografice și hidrologice ce nu permite inundarea. Orice activitate de construire de rezerve de apă de suprafață, precum și orice activitate care poate conduce la deteriorarea capacității de drenare a apei în vecinătatea depozitului trebuie aprobate preventiv.

Meteorologia și climatul. Trebuie să fie evaluat impactul caracteristicilor climatice ale amplasamentului asupra depozitului. Se vor lua în considerare îndeosebi precipitațiile, evaporarea și efectele potențiale ale condițiilor meteorologice extreme. Pentru faza de postînchidere a depozitului trebuie evaluate efectele datorate schimbării climatului.

Impactul activităților umane. Amplasamentul depozitului trebuie să fie localizat astfel încât activitățile umane rezonabil predictibile, care se așteaptă să aibă loc pe amplasament sau aproape de acesta, să nu compromită capacitatea de izolare a depozitului. O atenție deosebită trebuie acordată resurselor și potențialului de dezvoltare ale amplasamentului sau ale zonelor imediat învecinate. Căile de acces ale amplasamentului trebuie să fie construite și menținute astfel încât să permită accesul deșeurilor pe amplasament, cu un risc minim asupra persoanelor din populație. Utilizarea terenului și proprietatea asupra terenurilor trebuie luate în considerare în previziunile de dezvoltare și planificare regională ale zonei de interes.

Proiectarea depozitului Depozitul trebuie să fie proiectat astfel încât să asigure izolarea adecvată a deșeurilor depozitate pentru perioada de timp solicitată, luând în considerare caracteristicile deșeurilor, caracteristicile amplasamentului și cerințele de securitate aplicabile depozitului. Depozitul trebuie să fie astfel conceput încât după închidere să nu fie necesară întreținerea activă și nici îmbunătățirea caracteristicilor naturale ale amplasamentului, pentru a putea reduce orice impact asupra mediului. Modelul depozitului trebuie să ia în considerare cerințele de operare, planul de închidere, precum și orice alți factori care contribuie la izolarea deșeurilor și la stabilitatea depozitului, cum ar fi protecția deșeurilor față de evenimentele externe. Depozitul poate include bariere inginerești care împreună cu mediul amplasamentului izolează deșeurile de om și de mediul ambiant. Barierele inginerești includ coletul cu deșeuri și alte componente, cum ar fi celule, acoperișuri, consolidări, cimentări, umpluturi cu materiale, în scopul prevenirii sau întârzierii migrării radionuclizilor din depozit în mediul ambiant.

În conceptul depozitului se poate lua în considerare, la solicitarea operatorului, și posibilitatea ca deșeurile să fie transferate din depozit. În acest caz,

în proiectul depozitului trebuie să se ia în considerare această posibilitate fără a compromite performanțele de izolare pe termen lung ale deșeurilor în faza *gostînchidere*.

Conceptul depozitului trebuie să permită implementarea unui program de monitorizare a capacității de confinare a sistemului de depozitare, atât în faza de operare, cât și după închiderea depozitului. Programul de monitorizare ales nu trebuie să compromită performanțele sistemului de depozitare pe termen lung.

Construcția depozitului. Construcția unui depozit include activități cum ar fi: pregătirea amplasamentului, executarea unor clădiri sau a unor structuri, excavarea inițială și execuția gropilor pentru modulele de depozitare și construcția rețelei de drenaje, excavarea cavităților în rocă, construcția clădirilor subterane și a instalațiilor de monitorizare. Lucrările de construcție a unui depozit trebuie să înceapă numai după obținerea prealabilă a autorizației de construcție, eliberată de organul de reglementare în domeniul radioprotecției. Activitatea de extindere a construcției inițiale se poate face pe baza autorizației de operare a depozitului. Orice modificare a proiectului inițial al depozitului se aprobă de către organul de reglementare în domeniul radioprotecției.

25.2. Caracteristica procesului tehnologic de stocare a deșeurilor radioactive

Tratarea deșeurilor radioactive. Constă dintr-o serie de operații succesive:

- compactarea deșeurilor solide care se realizează la 30–150 atm. cu prese speciale prevăzute cu ecrane de protecție. Compactarea poate fi realizată după efectuarea în prealabil a unei operații de fragmentare, care însă poate reprezenta un mare pericol de contaminare;
- incinerarea este operația de reducere a volumului în cazul materialelor incinerabile. Gazele de ardere trebuie trecute prin filtre de mare eficiență pentru neutralizarea aerosolilor radioactivi. Limitarea volumului de deșuri incinerate, datorită activității rezultate din cenușă, se calculează în funcție de pericolul de contaminare internă cu pulbere radioactivă;
- separarea radionuclizilor din soluții se realizează prin mai multe metode: filtrarea materialului în suspensie, coagularea, precipitarea, electrodializa, schimbul ionic. Pentru tratarea deșeurilor radioactive s-a introdus și metoda de coagulare cu fosfați de calciu. Această metodă constă în introducerea în soluție a fosfatului de calciu solubil care, în urma unei reacții chimice, se transformă în fosfat de stronțiu insolubil, ceea ce permite eliminarea acestui radionuclid periculos. Întrucât cesiul este slab îndepărtat,



Fig. 112. Teren de stocare a deșeurilor radioactive.

prin această metodă s-a introdus și metoda tratării apei cu ferocianură de potasiu și sulfat de fier, ceea ce are ca urmare formarea unui gel de ferocianură feroasă, care antrenează cesiul, ruteniul și alți radionuclizi. O nouă metodă de tratare a stronțului se bazează pe captarea și concentrarea stronțului într-un material solid, lăsând în urmă lichid curat, utilizând ioni de interferență, Na și Ca, în concentrații similare cu cele din industria deșeurilor nucleare.

În stațiile de tratare a apelor radioactive, tratarea se face în două etape: o etapă de purificare brută (sedimentare, coagulare, precipitare); o etapă de purificare finală (evaporare, osmoză inversă).

Înglobarea deșeurilor într-un mediu de protecție se realizează prin mai multe metode:

- înglobarea în beton care este ieftină; betonul servește ca ecran pentru radiațiile γ și radionuclizi;
- înglobarea în bitum: se pot îngloba 50–60% substanță activă față de substanța inertă (bitumul); bitumul este o substanță hidrofugă, rezistă bine la toxifiere (pierdere prin dizolvare), chiar în condițiile apei de mare;
- înglobarea în masă ceramică sau sticlă;
- înglobarea în materiale plastice care sunt foarte rezistente, dar suferă o îmbătrânire sub acțiunea radiațiilor ionizante.

Depozitarea finală a deșeurilor înseamnă amplasarea definitivă a acestora într-o structură amenajată. Depozitele finale sunt:

- depozite de suprafață construite la suprafața sau în apropierea suprafeței pământului;
- depozite de adâncime mare (geologice) construite la adâncimi de peste 300 de metri de la suprafața pământului.

În depozitele finale de suprafață se depozitează deșeuri slab și mediu active de viață scurtă, în depozitele geologice se depozitează deșeuri înalt active sau deșeuri slab și mediu active de viață lungă, în țări ca Germania și Finlanda, toate tipurile de deșeuri se depozitează la adâncime.

Niciuna dintre metode nu este lipsită de inconveniențe și incertitudini.

În general, deșeurile cu activitate mică nu au nevoie de tratare: ele pot fi încapsulate și stocate perpetuu în mod direct fie prin îngropare la adâncimi

mici în diferite locuri, fie prin imersie controlată în mare. Cele mai multe deșeuri cu activitate intermediară nu apar sub o formă convenabilă pentru o stocare directă; ele trebuie încorporate într-un material inert ca betonul, bitumul sau rășinile. O parte dintre aceste deșeuri poate fi stocată perpetuu prin scufundare în mare, dar cele mai multe deșeuri sunt stocate temporar în diferite locuri, așteptând o decizie privind metoda cea mai bună de stocare definitivă.

25.3. Igiena muncii și radioprotecția personalului

Personalul care activează în procesele de condiționare și stocare trebuie să îndeplinească următoarele măsuri: a) protecția contra expunerii profesionale; b) optimizarea măsurilor de securitate și radioprotecție; c) limitarea expunerii de la sursele naturale și artificiale.

Planurile măsurilor sus-menționate trebuie să fie perfectate documental, iar salariații (personalul) trebuie să ia cunoștință de cele confirmate prin semnătură. O atenție deosebită se acordă măsurilor tehnice și de planificare a controlului expunerii profesionale.

Periodic, în conformitate cu regulamentele elaborate de către Ministerul Sănătății al Republicii Moldova, se efectuează examinarea stării sănătății personalului cu eliberarea permisului de activitate în sfera radiațiilor ionizante. Locurile de muncă trebuie să fie dotate cu utilajul și dispozitivele necesare de protecție verificate pentru monitoring și asigurate cu condițiile pentru utilizarea lor corectă. Personalul de categoria A (salariații) trebuie să fie instruit și atestat în problemele securității și protecției muncii, conform legislației în vigoare și a cerințelor organelor publice cu funcții de reglementare în domeniul radioprotecției și securității nucleare. Se interzice activitatea cu surse radioactive a salariaților care nu au efectuat un control medical preventiv și nu au permis de activitate în condiții nocive.

Informațiile despre expunerea profesională a personalului (categoria A) trebuie să fie înregistrate în registrul (cartela) de evidență a dozelor de iradiere externă și/ori internă. Datele obținute se păstrează pentru fiecare persoană pe parcursul a 50 de ani după finalizarea activității în sfera de acțiune a radiațiilor ionizante.

Personalul responsabil de respectarea securității radiaționale trebuie să întreprindă măsurile necesare atât pentru limitarea nivelului de expunere al salariaților de la orice surse (cu excepția celor naturale), care nu au atribuție cu munca efectuată, cât și pentru executarea cerințelor radioprotecției.

Personalul este obligat: să execute strict toate regulile și procedurile stabilite de patron și deținătorul de autorizație (licență) vizând securitatea și protecția; să utilizeze corect sursele de protecție, îmbrăcămintea, încălțăminte și utilajul pentru monitorizare; să colaboreze eficient și în permanență cu patronul și deținătorul de autorizație (licență) la realizarea și perfecționarea programelor de asigurare a securității și protecției pentru supravegherea sănătății și estimarea dozelor de iradiere; să prezinte patronului și deținătorului de autorizație (licență) informația exactă despre activitatea sa anterioară și recentă de muncă, legată de securitatea și protecția sa și a altor persoane; să nu admită acțiuni premeditate ce pot crea pericol de expunere pentru el și alte persoane și contravine cerințelor normelor tehnice și igienice; să posede informațiile, instrucțiunile și pregătirea necesară în problemele, care permit desfășurarea activității conform cerințelor normelor tehnice și igienice; să informeze la timp despre depistarea cazurilor de neexecutare oportună și calitativă a cerințelor normelor tehnice și igienice.

Condițiile de muncă ale lucrătorilor nu depind de prezența sau posibilitatea expunerii profesionale. Nu se admite oferirea sau folosirea condițiilor speciale de compensare, regimuri preferențiale în privința salariilor sau a condițiilor speciale de asigurare a duratei zilei de muncă și a concediului, zile libere suplimentare sau a pensiiilor în calitate de schimb al aplicării măsurilor corespunzătoare de protecție și securitate. Se interzice activitatea de studiere în sfera radiațiilor ionizante pentru persoanele mai tinere de 16 ani. Pentru persoanele de vârstă între 16 și 18 ani este permisă munca în zona controlată, dar numai în scop de studiere și numai sub supravegherea conducătorului studiului.

25.4. Deversarea în mediu a substanțelor radioactive. Stocarea deșeurilor radioactive și protecția generațiilor viitoare

În cazul utilizării fisiunii nucleare în scopuri pașnice, pentru obținerea curentului electric (energetica nucleară), în mediul ambiant sunt deversate o serie de substanțe radioactive, cu activități relativ reduse, când reactorul funcționează la parametrii normali. Pe plan mondial se consideră că uzina de tratare a combustibilului nuclear uzat prezintă cele mai mari riscuri de contaminare a mediului.

Principiile managementului în siguranță a deșeurilor radioactive

Principiul 1: Protecția sănătății populației – deșeurile radioactive trebuie să fie gestionate astfel, încât să asigure un nivel acceptabil al sănătății oamenilor.

Principiul 2: Protecția mediului – deșeurile radioactive trebuie să fie gestionate astfel, încât să asigure un nivel acceptabil de protecție a mediului.

Principiul 3: Protecția dincolo de granițele naționale – deșeurile radioactive trebuie să fie gestionate astfel, încât să fie luate în considerare efectele asupra sănătății oamenilor și asupra mediului, atât din țară cât și de dincolo de granițele țării.

Principiul 4: Protecția generațiilor viitoare – deșeurile radioactive trebuie să fie gestionate astfel, încât impactul estimat asupra generațiilor viitoare să nu depășească impactul considerat acceptabil în prezent.

Principiul 5: Povara asupra generațiilor viitoare – deșeurile radioactive vor fi gestionate în așa fel, încât să nu impună o povară excesivă asupra generațiilor viitoare.

Principiul 6: Cadrul legislativ național – deșeurile radioactive trebuie gestionate într-un cadru legislativ național care să prevadă alocarea clară a responsabilităților și prevederi pentru independența funcțiilor de reglementare.

Principiul 7: Controlul generării deșeurilor radioactive – generarea deșeurilor radioactive trebuie menținută la nivelul minim practic posibil.

Principiul 8: Interdependențele referitoare la generarea și gestionarea deșeurilor – interdependențele referitoare la generarea și gestionarea deșeurilor trebuie luate în considerare în mod adecvat.

Principiul 9: Securitatea instalațiilor – securitatea instalațiilor pentru gestionarea deșeurilor radioactive trebuie să fie asigurată corespunzător pentru toată durata de viață a acestora.

Deșeurile radioactive trebuie să fie gestionate astfel, încât impactul estimat asupra generațiilor viitoare să nu depășească impactul considerat acceptabil în prezent. Depozitarea definitivă a deșeurilor radioactive se poate face numai dacă este asigurată confinarea radionuclizilor, printr-un sistem multibariere, care constă din forma deșeurii, ambalaj, bariere ingineresti ale depozitului și bariere naturale corespunzătoare aflate pe amplasamentul depozitului definitiv.

Responsabilitatea pentru realizarea activităților principale de gestionare a deșeurilor radioactive produse în cadrul unei practici revine generațiilor care au beneficiat de pe urma practicii respective.

Centralele nucleare produc cele mai importante categorii de deșeuri radioactive. Energetica nucleară este recunoscută ca fiind singura industrie care își asumă responsabilitatea deșeurilor produse. Minimizarea volumului de deșeuri radioactive produse este o măsură a performanței în activitate, dar și o dovadă a preocupării și grijii permanente pentru sănătatea lucrătorilor centralei nucleare, a populației și a mediului. În ultimele decenii, în multe țări, manipularea și tratarea combustibilului ars, a deșeurilor radioactive în general s-a desfășurat în siguranță și fără incidente.

Nu s-a ajuns încă la un consens privind cea mai bună metodă pentru depozitarea deșeurilor radioactive. Inițial, elementele de combustibil folosite sunt depozitate deasupra pământului, adesea în apă rece, pentru câțiva ani sau chiar decenii, până când nivelul radioactivității s-a redus. În acest stadiu ele pot fi transferate la depozitare uscată, de exemplu, în cutii de metal. Chiar dacă este sau nu este îndepărtat plutoniul, multe planuri au ca obiectiv încapsularea și imobilizarea reziduurilor, apoi îngroparea acestora adânc sub suprafața terestră.

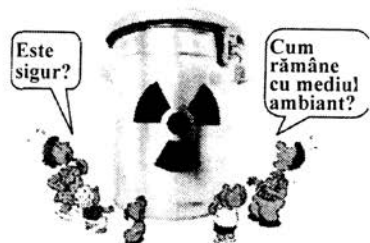


Fig. 113. Container cu deșeu radioactiv.

Un recipient de mărimea celui din figura 113 putea conține întreaga cantitate de deșeu înalt activ care a rezultat în urma producerii cantității de energie electrică consumată de o persoană în decursul vieții.

Containerul pentru această încapsulare ar fi mai bine să fie realizat dintr-un metal puternic, rezistent la coroziune, cum ar fi titanul sau cuprul (fig. 113). Cutiile sunt făcute pentru a dura câteva sute de ani cel puțin, înainte de a apărea scurgerile. În Suedia, cutiile sunt proiectate să dureze 100.000 ani, după această perioadă nivelul reziduurilor nefiind mai mare decât cel al minereului natural de uraniu. Cutiile vor fi îngropate la 500-1000 m sub scoarță. Caracteristicile geologice ale părților îngropate trebuie să includă stabilitate mare, pentru a nu fi distruse de cutremure sau erupții vulcanice și să aibă o permeabilitate scăzută pentru prevenirea interacțiunii cu apa. Singura metodă, prin care se realizează cele necesare fără a îngreuna situația generațiilor viitoare, este îngroparea foarte adânc în pământ. Unele guverne nu acceptă ideea de depozit permanent a acestor reziduri, ele vor să poată recupera plutoniul din combustibilii folosiți dacă e nevoie de energie nucleară în viitor.

Lecțiile învățate în anii '60 și '70, la începuturile energiei nucleare, au condus la o adevărată reformă a modului de gospodărire a deșeurilor radioactive, în special în ceea ce privește depozitarea finală a acestora.

În ultimele decenii, au avut loc progrese importante în modul în care se pregătește deșeurile în vederea depozitării, dar și în definirea cerințelor care trebuie îndeplinite de amplasamentul unui depozit final. Toate acestea au permis eliminarea cauzelor care au condus la scurgeri radioactive din depozitele mai vechi și impunerea unor soluții tehnice avansate de depozitare, care asigură izolarea efectivă a deșeurilor radioactive și care protejează populația și mediul ambiant.

În legătura cu alegerea amplasamentelor pentru depozitarea deșeurilor, strategia actuală este ca fiecare țară responsabilă de propriile deșeurile să le depoziteze cum dorește pe propriul teritoriu. Fiecare țară trebuie să fie responsabilă de deșeurile pe care le produce, nu să plătească țărilor sărace pentru a le stoca, așa cum se întâmplă, de obicei, în industria chimică. Fiecare țară trebuie să răspundă, de la început până la sfârșit, pentru opțiunile sale.

Este adevărat că centralele nucleare produc o cantitate importantă de energie, însă depozitarea deșeurilor radioactive pe termen lung constituie încă o problemă majoră.

Partea VI.

ASPECTE ECOLOGICE ALE POLUĂRII MEDIULUI AMBIANT CU RADIAȚII IONIZANTE

Capitolul 26.

PARTICULARITĂȚI DE MIGRARE A SUBSTANȚELOR RADIOACTIVE ÎN MEDIUL AMBIANT

Pentru a ne forma o părere despre transformările complexe ale substanțelor evacuate în natură, cât și despre condițiile în care se efectuează cercetările radiologice, este necesară o scurtă trecere în revistă a acțiunii geologice pe care o au apele și viețuitoarele asupra compoziției chimice a solului.

Alterarea reprezintă un fenomen complex de transformare a materialelor mediului ambiant, în care au loc procese mecanice și fizice de dezagregare, fără schimbarea compoziției chimice a produselor naturale, cât și procese chimice și biochimice prin care au loc profunde schimbări în compoziția chimică a produselor menționate. În general, alterarea chimică și biochimică este accelerată de către alterarea mecanică sau fizică, prin creșterea gradului de dispersie. Dintre principalele transformări, se pot aminti: dizolvarea sub acțiunea CO_2 , H_2O , SO_2 etc., urmată de cristalizare sau gelificare: oxidarea sub influența H_2O ; harmiroliza (alterarea pe fundul apei), formarea humusului etc. Toate acestea pot constitui procese generale întâlnite în ecosistemele din apă și sol. Caolinizarea feldspaților sub acțiunea acizilor humici reprezintă un alt important exemplu de interacțiune.

Experiența a arătat că elementele chimice și radionuclizii asociați pe suspensiile din apă sunt absorbiți mult mai ușor de către organismele acvatice. Această constatare atrage atenția în mod deosebit asupra influenței procesului dat asupra distribuției izotopilor radioactivi în biosferă.

Transportul materialului la distanțe mari de locul deversării ridică importante probleme în legătură cu generalizarea contaminării radioactive a mediului. Apele curgătoare pot asigura transportul următoarelor materiale: mâlul fin cu viteza de 0,07 m/sec., nisipul cu viteza de 0,16 m/sec., nisipul grosier cu viteza de 0,21 m/sec., pietrișul mărunt cu viteza de 0,31 m/sec., pietrișul de $2,7 \text{ cm}^3$ cu viteza de 0,97 m/sec.

La calcarul silicios s-a determinat o rază de deplasare de 86 km, iar la argile – de 42 km. Bittle admite că suspensiile apoase sunt formate în general din 50% calcită, 28% argile, 10% dolomit, 10% cuarț și 2% materii organice. Procesul de depunere este diferențiat la mal (depunere stratificată încrucișată),

față de cel de adâncime sau de larg (depunere stratificată în paralel). Nume-roase studii de sedimentologie au pus în evidență variate forme de mълuri și sedimente. Se admite, de exemplu, că sedimentele sunt alcătuite din produse provenite din 3 surse de substanțe și anume: litogene (cuarț), biogene (apatite, CaCO_3 , diatomit) și hidrogene (argile, minerale, feromagneziene).

În funcție de compoziție și de procesul de formare, mълurile pot fi grupate în următoarele categorii: 1) mълul albastru foarte răspândit conține hidroxid fieric, sulfură de fier, materiale argiloase, cuarț, feldspați, amfiboli și fragmente de cochilii; 2) mълul de coprolite conține cantități mari de dejecții ale organismelor bentonice; 3) mълul roșu conține mari cantități de argile, oxizi fierici și carbonați de origine organică; 4) mълul și nisipurile verzi bogate în glauconit, calcite, resturi ale organismelor silicoase (diatomit), granule și cuarț (silicagel) și particule argiloase; 5) mълul calcaros conține peste 90% calcită (marnă) și cochilii de moluște; 6) mълul negru este gelatinos fiind format din humusul provenit din descompunerea materialelor organice; 7) mълul silicos conține aproximativ 40% fruste de diatomee moarte, 89% diatomit, 23% organisme moarte și carbonat, și 36% minerale.

Litosfera ca parte componentă importantă a mediului reprezintă o structură complicată și încă incomplet cunoscută, formată din 0,03% atmosferă, 7,08% apă și 92,89% materiale solide. Acestea din urmă sunt alcătuite din 95% roci magmatice și metamorfice și numai din 5% roci de sedimentare. Dintre materialele cele mai frecvente se pot aminti, în ordinea descrescândă a răspândirii lor, următoarele: feldspații, piroxenii, amfibolii, iolivina, cuarțul și calcita. Răspândirea procentuală ar fi următoarea: 58,40% – silicați de Al, Ca, K și Na; 16,8% – feromagneziene; 12,6% – cuarț; 3,6% – micle; 1,5% – calcit; 1,1% – dolomit și 6% – diferite materiale. Humusul, ca substanță organică, se formează în urma degradării celulelor și țesuturilor din organisme moarte sau produse organice excretate. Din punct de vedere chimic, humusul este format din acizi humici și acizi fulvici. Primii sunt cicluri macromoleculare, ceilalți – micromolecule puternic acide.

Viețuitoarele responsabile de totalitatea transformărilor biochimice din mediu sunt foarte variate și dificil de grupat în categorii radioecologice. Acestea prelucrează aproape 60 de elemente chimice, considerate, în funcție de conținutul cantitativ în organism, ca macroelemente, când alcătuiesc 0,01–0,1% din organism (O, H, C, N, Ca, S, P, K, Mg, Fe, Na, Cl și Al); microelemente în conținut de 10^{-5} – 10^{-3} % (Yn, Br, Mn, Cu, I, Au, B, F, Ti, V, Cr, Ni, Ne, Be, Ag, Co, Ba și Th) și ultramicroelemente cu un conținut de 10^{-12} – 10^{-6} % (Rb, Hg, Ra, Rn, U etc.).

Transformările poluanților radioactivi în condițiile apelor naturale

După expulzarea lor în mediul ambiant, deșeurile radioactive interacționează cu produsele naturale sau artificiale întâlnite în bazinele de apă ori în sol. Aceste procese sunt influențate de către numeroși factori, dintre care se pot aminti: locul deversării (la suprafață sau în profunzime), turbulența apei, oscilațiile și reciclarea apelor, variația debitului, natura bazinului (ape curgătoare sau stătătoare). Radionuclizii pot fi absorbiți la suprafață sau în interiorul particulelor ce formează faza solidă, de asemenea, pot fi înglobați în organismul plantelor și animalelor. Modificarea condițiilor din mediu poate determina desorbția nuclizilor din faza solidă, prin fenomenul numit eluție (dezlocuire), cât și în urma proceselor de alterare sau prin putrezire în condițiile fermentației anaerobe.

Radionuclizii din apă pot contamina organismul uman prin consum potabil sau menajer, prin activități recreative (înot, canotaj etc.), prin irigarea culturilor, prin utilizări industriale (ca solvent, spălări etc.) sau ca mediu de viață pentru pești. Acumularea radionuclizilor în biosferă a constituit tematica unor materiale publicate anterior, fiind procesul care poate reprezenta un indicator al contaminărilor radioactive, mult sub limita minimă de decesare prin mijloacele fizico-chimice. Vehicularea nuclizilor spre om, prin intermediul florei sau faunei, ne obligă să precizăm radionuclizii critici, cât și speciile sau indivizii critici. Ca elemente de selecționare se folosesc factorii de concentrare a nuclizilor, radiotoxicitatea acestora, frecvența de deversare, probabilitatea de consum a speciei etc. De exemplu, la autocentrala Bradwell, nuclidul Zn-65 se concentrează în stridii, care constituie alimentul critic; la uzina de retratare a combustibilului nuclear de la Windscale, nuclidul critic este Ru-106, iar alga comestibilă *Porphyra* reprezintă specia critică. Evacuarea deșeurilor radioactive în sol poate duce în continuare la contaminarea apelor subterane, frecvent utilizate la irigare și în scop potabil. Schemele anterioare sugerează variate căi prin care substanțele radioactive deversate în apă pot ajunge la om.

Deșeurile radioactive într-un bazin natural de apă pot fi diluate, dispersate, depozitate prin depunere etc. Contactul nuclizilor cu apa râurilor sau a lacurilor atrage după sine procese de difuzie moleculară sau ionică, asociată deseori de o difuzie turbulentă.

Diluarea și dispersia radionuclizilor poate fi influențată de către izotopii neradioactivi prezenți în soluția apoasă de stratificare sau scurgere lamelară a pânzei de apă. O parte din radionuclizi vor fi reținuți de către particulele în suspensii sau sediment, prin adsorbție fizică sau chimică. În principal, materi-

alele naturale care au capacitatea de a reține izotopii radioactivi sunt: argilele, acizii humici, nisipurile, calcitele etc. Forța cu care sunt reținuți radionuclizii de către acestea depinde de natura fizico-chimică a izotopului din apă, a argilelor, a substanțelor humice, a nisipurilor etc.

Orice schimbare în compoziția sau starea fizică a apei poate determina, în continuare, eliberarea substanțelor radioactive fixate pe aceste materiale.

Comportarea radionuclizilor în principalele ecosisteme hidrice

În prezent se cunosc numeroase lucrări referitoare la comportarea diversilor radionuclizi în cele mai variate ecosisteme apoase. Dintre numeroasele exemple studiate și publicate în continuare vor fi prezentate numai câteva, cu scopul de a releva importanța radioecologiei în cunoașterea și prevenirea generalizării contaminării radioactive a mediului ambiant.

Gloyna stabilește, de exemplu, că nuclizii Sr-85, Ru-103, Co-60 și Cs-137 sunt acumulați de către plantele acvatice în mod diferențiat. Picat și Grauby demonstrează că în apele din aval ale unor centrale electro-nucleare sedimentele conțin $1-3 \times 10^4$ pCi¹³⁷ Cs/kg, menținându-se pe suportul solid numai 95% din Cs-137 existent în soluția apoasă cu activitatea de $2,88 \times 10^{-6}$ Ci/m³. Astfel se realizează un depozit activ de $0,136 \times 10^{-6}$ Ci/g sediment. Se constată că la concentrații mici în sedimente apoase, acumularea nuclizilor în fază solidă este mult superioară cazului când concentrația în suspensii este mai mare. Se poate afirma, deci, că la contaminări cronice sau acute ale bazinelor de apă, alături de nuclizii reținuți pe sedimente, va exista continuu o cantitate radioactivă în soluție. Fenomenul poate fi atribuit faptului că sedimentele nu asigură o reținere totală a nuclizilor din soluție și, în același timp, acționează și procesul invers de desorbție, sub influența unor factori de mediu.

Contaillon, Kirchmann și Van der Borgh au observat reținerea nuclizilor Co-60 și Mn-54 pe sedimente naturale, care pot fi parțial desorbiți. Studiul redă cantitativ fenomenul prin exprimarea coeficientului de distribuție al nuclizilor între apă și sediment. Iskrș și Colab. arată, de exemplu, că nuclizii elementelor Ra, Th și U se acumulează în componentele solide ale apelor naturale, în următoarea ordine descrescândă: detritus apos (plante moarte > plante > sediment anorganic). Ordinea crescândă a adsorbției radionuclizilor amintiți este: Th > Ra > U. Foulquier și Graubz relevă, prin rezultatele obținute, existența unei „constante de distribuție” a radionuclizilor în organismele vii, a cărei valoare depinde de condițiile mediului în care are loc procesul respectiv. Ei au arătat influența unor factori fizico-chimici asupra constantei de distribuție cum sunt: lumina, temperatura și timpul de stocare a nuclizilor în apă.

R. Guennelon evidențiază că schimbul între nuclidul Sr-90 astfel fixat nu este extras din calcită de către apa încărcată cu CO₂ sau de către chelatoformatori (EDTA). El a observat însă acțiunea tripolifosfatului, care desoarbe parțial Sr-90, deversat în apă sub formă ionică, migrează în apa de suprafață sau subterană în mod diferit, în funcție de natura solului cu care vine în contact. Wanderer efectuează un amplu studiu referitor la capacitatea de autoepurare a apelor contaminate radioactiv, în care acțiunea decontaminantă revine sedimentelor minerale, detritusului organic, florei, faunei acvatice. Apa contaminată cu o activitate de $5 \cdot 10^{-8}$ Ci/l, conținând nuclizi Ra-226, Sr-90, Pl-210, Po-210 și produse de fisiune ale U-235, curgând cu un debit de 5-15 m³/sec., realizează o diluare de 1:1000. Prin determinări sedimentologice s-a măsurat un transport de 300–5000 g/sec., sedimentul având un conținut de 22% argilă, 30% substanțe organice și 48% cuarț și calciu. Autorii au stabilit valoarea coeficientului de absorbție prin următoarea relație:

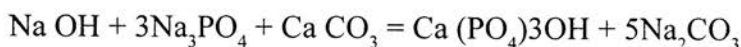
$$G \text{ (coeficient de absorbție)} = \text{activ. în sediment/g/ activ. în apă/g}$$

În urma măsurărilor efectuate s-a găsit pentru produsele de fisiune o valoare $Q=10\ 000$. Urmărindu-se activitatea sedimentelor după 5 săptămâni la 50 m în aval de canalul deversor al reactorului și la 50 m în amonte, se găsește o distribuție verticală a activității în funcție de granulația sedimentului. Se constată ca la granulația de 75-100 microni activitatea reținută a fost maximă.

Bittel a experimentat comportarea Ru-106 în ecosistemele din apă și sol, în funcție de influența unor factori. Ei arată că nuclidul deversat apare în variate forme chimice și are o comportare diferită. În urma studiului efectuat s-a ajuns la concluzia că este foarte important a se cunoaște proprietățile specifice ale mediului acvatic în care s-a produs contaminarea. Radionuclidul Ru-106 din combustibilul nuclear tratat apare sub formă complexă de nitrozilruteniu, parțial anionic sau cationic și o parte sub formă moleculară. Aceste forme au valori complet diferite privind solubilitatea lor în apă. În același timp, noțiunea de solubilitate este relativă în condițiile apelor poluate radioactiv, deoarece numeroși compuși prezenți în mod normal sau deversați pot produce peptizarea sau solubilitatea formelor insolubile. Interesant de remarcat este faptul că prin stocarea timp de 30 de zile a combinațiilor de Ru-106, mobilitatea lor electroforetică se modifică. Astfel, în HNO₃ 1N, complexul tetranitrozil-ruteniu, stocat 7 sau 30 zile, prezintă diferențe foarte mici ale mobilității electroforetice (diferența este de 1 cm). Complexul păstrat, stocat în HNO₃ 8N timp de 7 și 30 de zile, dă diferențe mult mai mari în ceea ce privește migrarea electroforetică (diferența este de 9 cm). Prin urmare, stocarea acestor

combinații, în condiții diferite, provoacă transformări profunde în structura și proprietățile agenților poluanți.

Jacobs a observat că procesul de schimb al cationilor mono- și bivalenți cu numeroasele argile și nisipuri diferă de la un element la altul; Sr, de exemplu, este selectiv adsorbit de 1,25 ori mai mult decât Cs. În nisipurile din Richfiel s-a constatat că Sr se deplasează cu o viteză de 10–100 ori mai mică decât apa care îl vehiculează: Ca se deplasează mult mai lent ca Sr, iar Ru migrează cu o viteză mult superioară. Jacobs a mai observat că elementul Sr nu precipită în prezența CaCO_3 , menținându-se astfel o cantitate mare de Sr-90 în soluție. Baetsle urmărește coeficientul de distribuție a sistemului complex format din Cs, Sr, Mg și K față de argilele montmorilonitice și glauconitice. El a constatat că schimburile sunt independente unele de altele în cazul sistemului ternar alcătuit din argile și o pereche de cationi. Belot explică reținerea Sr în solurile calcaroase prin procesul de incluziune în rețeaua cristalină, cât și substituirea ionului carbonat prin ionul fosfat. Astfel, formarea apatitei din calcită în mediu alcalin și în prezența fosfaților constituie fenomene de „înlocuire metasomatică”, care decurge în felul următor:



În rețeaua cristalină a apatitei noi formate, locul ionului Ca^{2+} poate fi ocupat prin izomorfism de către ionii metalelor: Sr, Mg, Ba, Pb, Zn etc.

Tamura constată că mineralele cu structură mică au afinitate față de Ca. Biotita, un minereu cu structură primară mică, adsoarbe în mod deosebit nucleul, Cs, deși are capacitate de schimb ionică inferioară față de alte minerale. Montmorilonitul natural adsoarbe diferit Cs și Sr comparativ cu ionii metalelor K, Na, Li etc.; fenomenul diferă mult de la o argilă la alta, în funcție de structura ei.

Gaillardreau a determinat că acizii humici din solurile nisipoase au capacitatea de a reține cantități apreciabile de Sr-90 sub formă neionică, probabil într-o stare complexată. O serie de alte cercetări au relevat capacitatea diferită de adsorbție și stabilitatea variabilă de menținere a radionuclizilor pe argile de tip diatomitic sau montmorilonitic.

Puterea de reținere a radionuclizilor de către argile diferă în funcție de natura chimică a izotopului.

În fine, Hwa-Sheng Cheng stabilește rolul cantității ionilor schimbabili din suspensii asupra distribuției izotopilor radioactivi din apă. Deși s-au efectuat numeroase studii asupra fixării radionuclizilor pe argile, fenomenul, și mai ales natura procesului de reținere, este puțin explicat. S-a încercat

cat să se coreleze starea de hidratare a ionilor sau volumul lor cu capacitatea de fixare pe diverse suporturi argiloase. Hwa Sheng Cheng subliniază că înțelegerea proprietății solurilor și sedimentelor de a fixa și reține ionii radioactivi necesită un studiu detaliat asupra tuturor componentelor chimici din aceste materiale.

Ca urmare a ideilor prezentate mai sus, se conturează o serie de concluzii și anume:

- pentru realizarea protecției sanitare împotriva contaminării umane sunt necesare numeroase informații radioecologice, sub cele mai variate aspecte. În această problemă importantă, cercetările fundamentale și aplicative trebuie unite, concentrându-se atenția asupra unor aspecte majore, cum sunt: comportamentul viețuitoarelor în prezența elementelor radioactive, starea fizico-chimică a acestor elemente în mediu, concentrația, dispersia, transmiterea și dispariția lor din mediul ambiant contaminat;
- se poate afirma că preocupările majore ale radioecologiei contemporane sunt orientate în următoarele direcții: procese de transfer al radionuclizilor în apă; ciclul radionuclizilor în ecosistemele acvatice; procese de transfer al radionuclizilor în sol; transferul radionuclizilor în plante cultivate și produse alimentare; ciclul radionuclizilor în ecosistemele terestre și efectul radiațiilor asupra ecosistemelor.

Acumularea (concentrarea) radionuclizilor din apă de către producătorii primari (algele)

Încă cu multe decenii în urmă, prin cercetările lui Justus von Liebig, se știa că plantele verzi autotrofe realizează substanțele organice necesare, prin sinteza lor proprie, plecând de la combinațiile anorganice cum sunt: apa, sărurile minerale, CO_2 etc. Nutriția algelor a constituit în acest sens o problemă importantă, ce a putut permite, prin rezultatele cercetărilor efectuate, explicarea proceselor de încorporare în biosferă a elementelor chimice. Rezultatele prezentate în acest sens de către Ghileva ne permit să precizăm că algele sunt factori de acumulare pentru toate elementele chimice existente în apă. Analiza rezultatelor arată că factorii de acumulare diferă mai puțin de la o specie la alta, decât de la un element la altul pentru aceeași specie de algă. Aceasta relevă că acumularea este un proces biologic intens influențat de natura chimică a radionuclidului. Astfel, se consideră mai puțin acumulate elementele: S, Ca, Sr, Cs; cu o acumulare intermediară: Yn, Z, Ce, Pm, Hg.

Este interesant de relevat faptul că algele filamentose acumulează mai intens elementele chimice decât algele unicelulare și coloniale.

Branca și Paoletti evidențiază printr-un studiu experimental influența formei chimice a radionuclizilor asupra valorii factorului de acumulare în alge. Astfel Ru-106 prezintă în acumularea de către *Scenedesmus auratus* valoarea factorului F.C. = $1,48 \times 10^5$ pentru nitrozilul de Ru. Autorii amintiți precizează că au constatat diferențe nete între valorile F.C. la algele separate prin centrifugare sau prin filtrare cu ajutorul membranelor, ceea ce scoate în evidență rolul tehnicii de prelucrare a biomasei în determinarea procesului de acumulare.

Wright atrage atenția supra cazului specific, în deversările efluenților de la reactorii cu apă sub presiune (P.W.R.), care prin poluarea termică influențează evoluția compoziției fitoplanctonului, constatându-se astfel o variație a temperaturii între 20-40°C, o deplasare a populației planctonice de la diatomee spre alge verzi și apoi spre alge albastre. Un reactor nuclear poate polua termic ape din vecinătate cu 15°C, iar la distanțe de 1,5 km poluarea termică mai atinge 1°C.

Temperatura poate modifica procesul de acumulare, astfel *Plectonema boryanum* acumulează în cantitate maximă Zn-65 la 40°C, acumulează maximum la 35°C izotopul Mn-54, iar la temperatura de 25°C – Co-57.

Se cunosc numeroase lucrări privind acumularea și transferul radionuclizilor la alge. Astfel, Iskrs determină coeficienții de concentrare pentru U-238, Th-232 și Ra-226. Se determină F.C. pentru Th 232 la *Chlorella elipsoidea* de 3×10^5 , iar pentru U-238 F.C. – de 9×10^4 . Nuclidul Ra-226 se concentrează în *Scenedesmus obliquus* cu F.C. 2×10^4 .

Baptist analizează, într-o lucrare publicată în 1967, procesul de transfer trofic al nuclizilor Zn-65 și Cr-51 de la fitoplancton.

Participarea unor oligoelemente la numeroase funcții metabolice ale algelor, cunoscută și menționată în literatură cu 40-50 ani în urmă, explică în general procesul de acumulare din apă al nuclizilor Co-57 și Cs-134 de către algele *Chlorella vulgaris* și *Scenedesmus quadricauda*. Este evident faptul că influența luminii asupra valorii factorului F.C. evidențiată în experiență relevă contribuția pe care o au microcantitățile de Cs și mai ales de Co asupra fotosintezei algelor. În același sens pot fi interpretate și rezultatele obținute în condițiile unei îngrășări prealabile a culturii cu CO₂ sau în lipsa acestui procedeu, care influențează atât valoarea factorilor de concentrare, cât și perioada de timp la care se evidențiază acumularea maximă a radionuclizilor. Trebuie de subliniat în acest sens că literatura menționează un efect similar constatat și la Mn, care stimulează adsorbția de ¹⁴CO₂ de către *Chlorella vulgaris* numai în condiții aerobe. Sunt ipoteze care sugerează că oligoelementul Co este re-

ținut în alge, deoarece anumite produse de fotosinteză complexează chimic ionii de Co^{2+} . În același timp, literatura arată că un exces al acestor elemente în mediul de cultură diminuează sau inhibă absorbția oligoelementelor de către alge. Influența în timp a oligoelementelor asupra fotosintezei se explică prin faptul că acestea acționează printr-un ansamblu de procese și printr-un ansamblu de procese indirecte, care își evidențiază efectele în cursul următoarelor 24-48 de ore.

Modificarea în timp a valorii factorului F.C. și a perioadei de maximă concentrare a radionuclizilor poate fi explicată printr-o redistribuire a Co-57 și Cs-134 la un număr diferit de celule sau la o cantitate diferită de biomasă în cultura respectivă. Asemenea procese sunt posibile și ele au fost de altfel evidențiate de către rezultatele experimentale.

Paralel cu aceste procese metabolice, se admite astăzi că mai au loc o serie de procese legate de permeabilitatea membranelor, de încorporarea ionilor în spațiul liber aparent al celulelor de algă cât și de echilibrul Donnan. În literatură chiar se afirmă că spațiul aparent ar egala concentrația ionilor din citoplasmă cu cea din soluția exterioară. Rezultatele evidențiază rolul algelor ca o primă verigă ce acumulează ionii radioactivi ai metalelor grele cu factorii superiori ordinului 10^3 . În aceste condiții algele ar constitui un indicator biologic al poluării bazinelor naturale în mod cronic și cu activități mici. În utilizarea acestui factor va trebui să se țină cont de variațiile de iluminare (noaptea ori ziua, vara sau iarna, cer senin sau noros etc.). De asemenea, este necesar a se lua în calcul și eventuala prezență a CO_2 în apă.

Rezultatele obținute în laborator evidențiază clar faptul că valoarea factorilor de acumulare de către unele alge a radionuclizilor din apă depinde în mare măsură de viteza de creștere a biomasei, cât și de viteza de înmulțire a acestor celule. Aceste fenomene pot fi influențate de către factorii externi, aparținând mediului, dar în același timp se remarcă și o influență a naturii chimice a radionuclizilor încorporați de către celule.

Prin urmare, putem admite utilizarea culturilor de alge ca indicatori calitativi și poate chiar selectivi pentru caracterizarea procesului de contaminare radioactivă a bazinelor de apă.

Pentru o apreciere cât mai obiectivă a valorii algelor ca indicatori, se impune, însă, și precizarea factorilor de mediu ce pot influența procesul de concentrare a radionuclizilor din apă.

SERII RADIOACTIVE

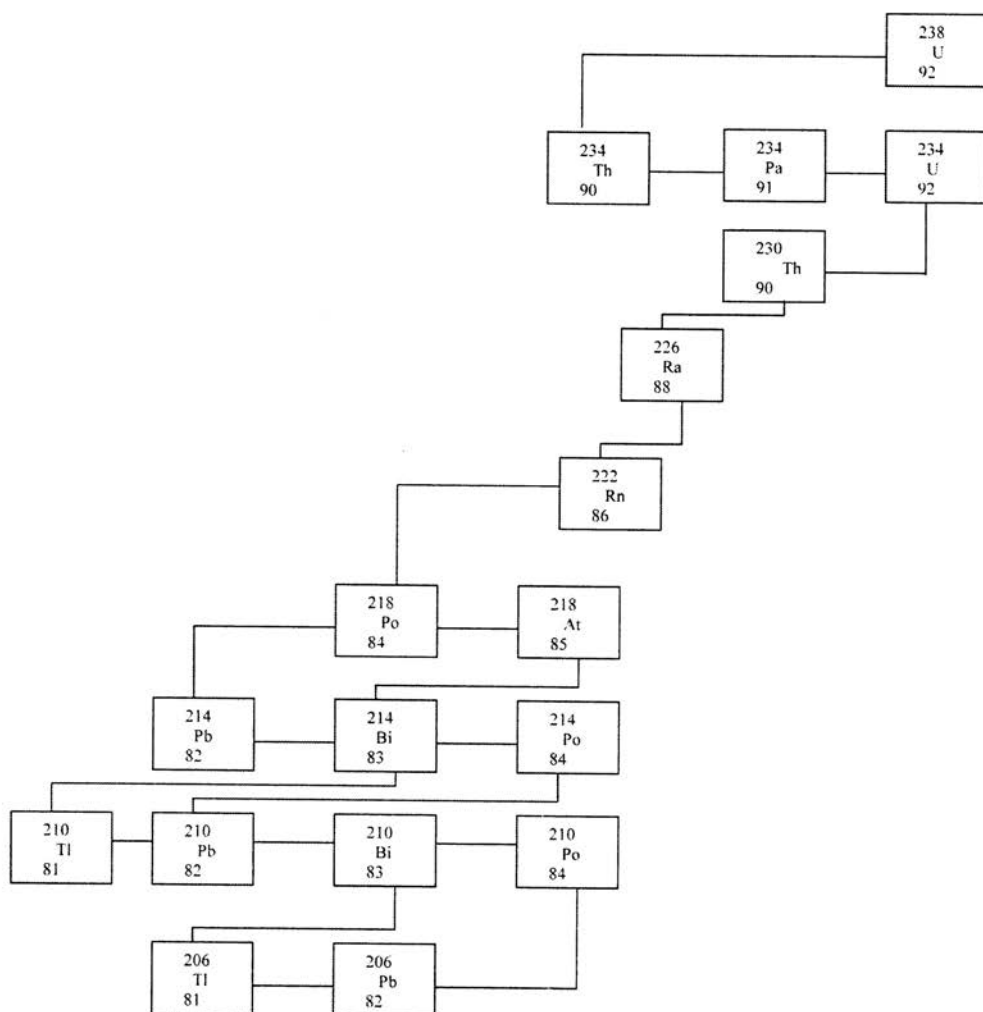


Fig. 114. Seria Uraniului.

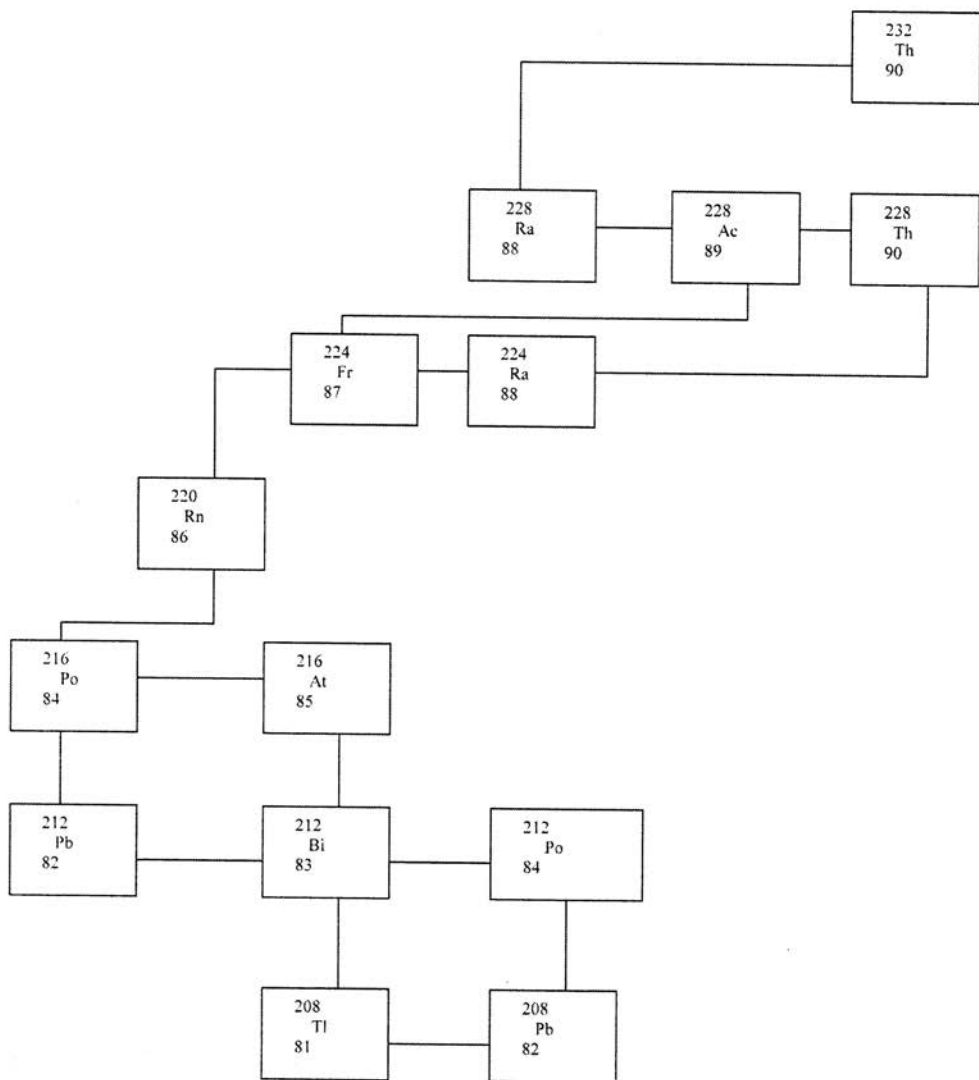


Fig. 115. Seria Thoriului.

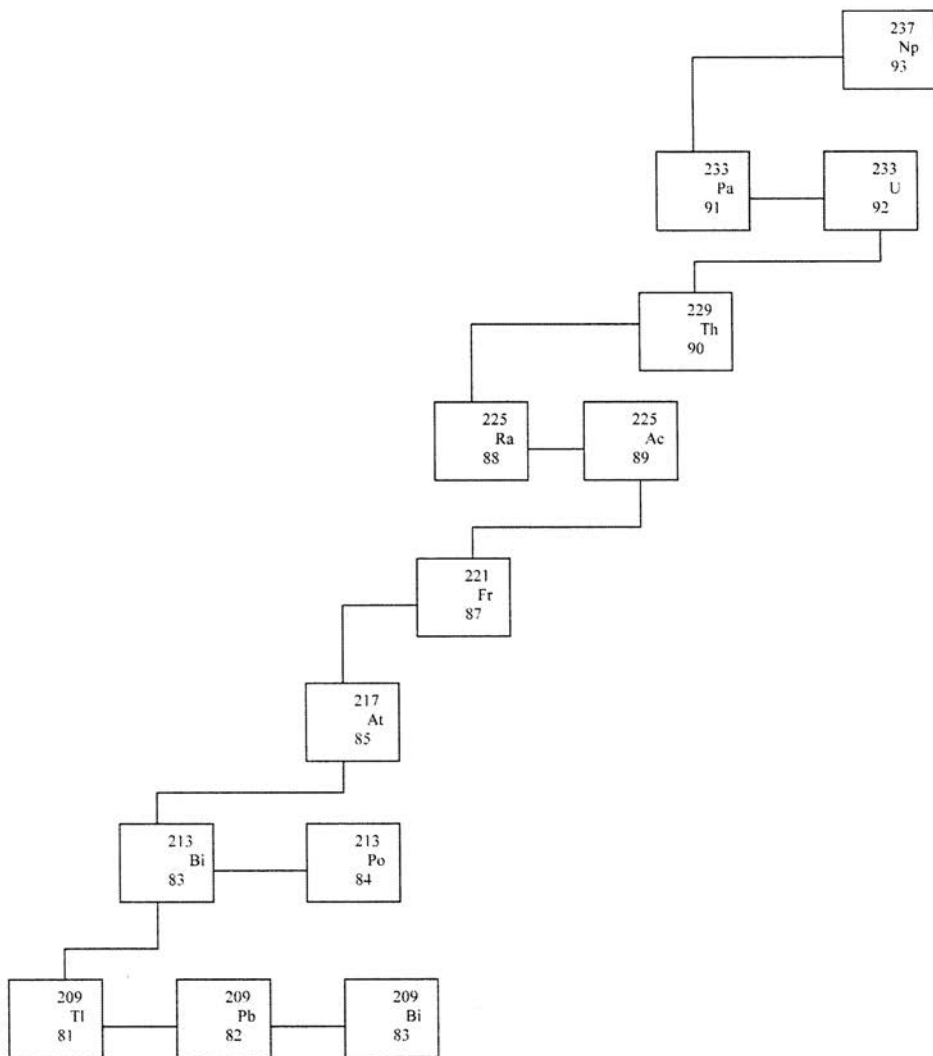


Fig. 116. Seria Neptunului.

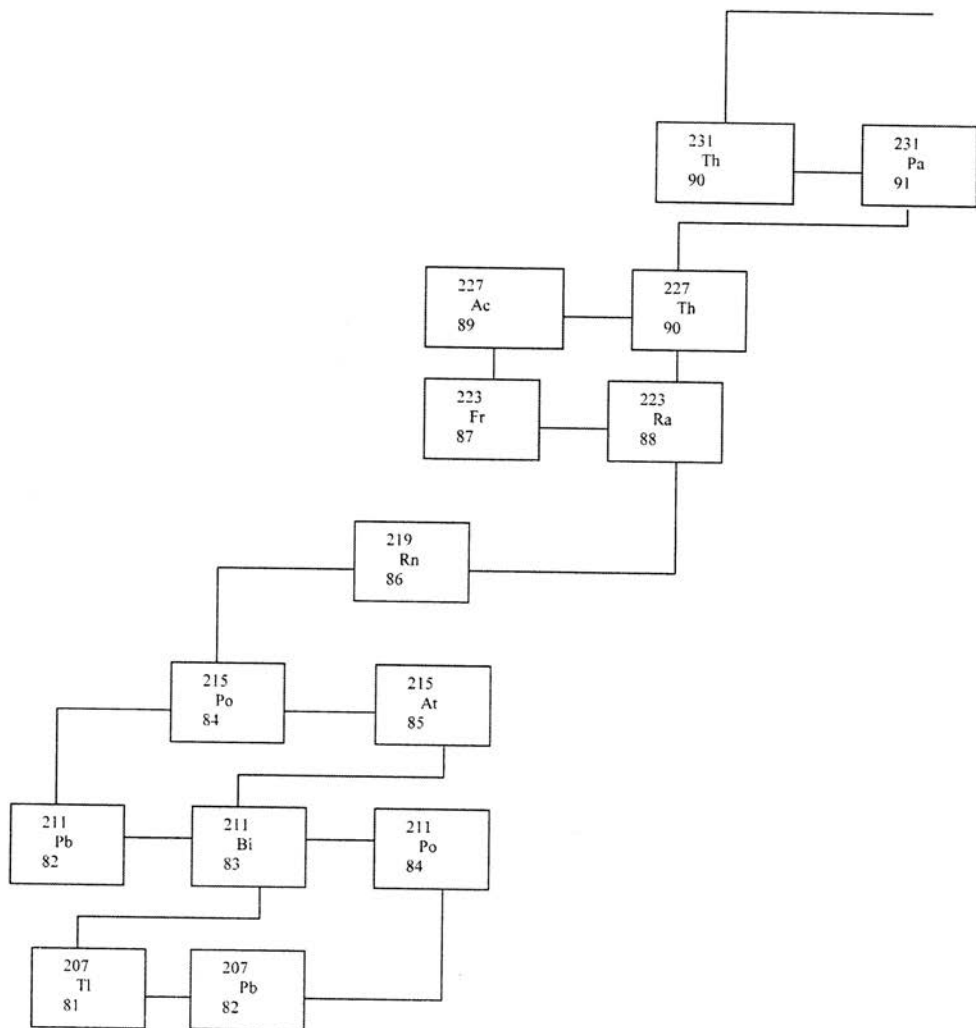


Fig. 117. Seria Actinouraniului.

Sindroamele acute ale radiațiilor ionizante
(Bushberg, JT, Seibert, JA, Leidhoit, EM, și Boone, JM [2001])

Sindromul	Doza	Efectele prodromale	Tabloul clinic	Supraviețuirea fără tratament	Supraviețuirea cu tratament
Hematologic	0,5-1,0 Gy	Diminuate	Diminuarea neînsemnată a celulelor sangvine	Unele persoane	Unele persoane
	1,0-2,0 Gy	Diminuate spre moderate	Simptomele timpurii ale dereglărilor măduvei osoase	Probabil (>90%)	Unele persoane
	2,0-3,5 Gy	Moderate	Dereglări severe ale funcției măduvei osoase	Posibil	Probabil
	3,5-5,5 Gy	Moderate spre severe	Dereglarea gravă a măduvei osoase; dereglarea ușoară a funcției intestinelor	Deces posibil în 3-6 săptămâni	Posibil
	5,5-8,0 Gy	Severe	Pancitopenia măduvei osoase și dereglarea moderată a intestinului	Deces posibil în 2-3 săptămâni	Posibil în caz dacă celulele-stem sunt substituite sau restabilirea este reușită
	8,0-10,0 Gy	Severe	Dereglări combinate ale sistemului gastrointestinal și a măduvei osoase; hipotensiune	Deces în 1,0-2,5 săptămâni	Decesul e posibil, dar supraviețuirea este posibilă dacă celulele-stem sunt substituite sau restabilirea este reușită

Gastrointestinal	10,0-50,0 Gy	Simptome prodromale severe, sindromul hematologic care se suprapune cu dereglări severe gastro-intestinale; dezechilibrul electrolitic; oboseală, moarte gastrointestinală		Deces în 5-12 zile
Neurovascular	> 50 Gy	Simptome prodromale severe suprapuse cu efectele SNC. Ataxie, edem sever, dereglări neurovasculare, șoc.		Deces în 2-5 zile

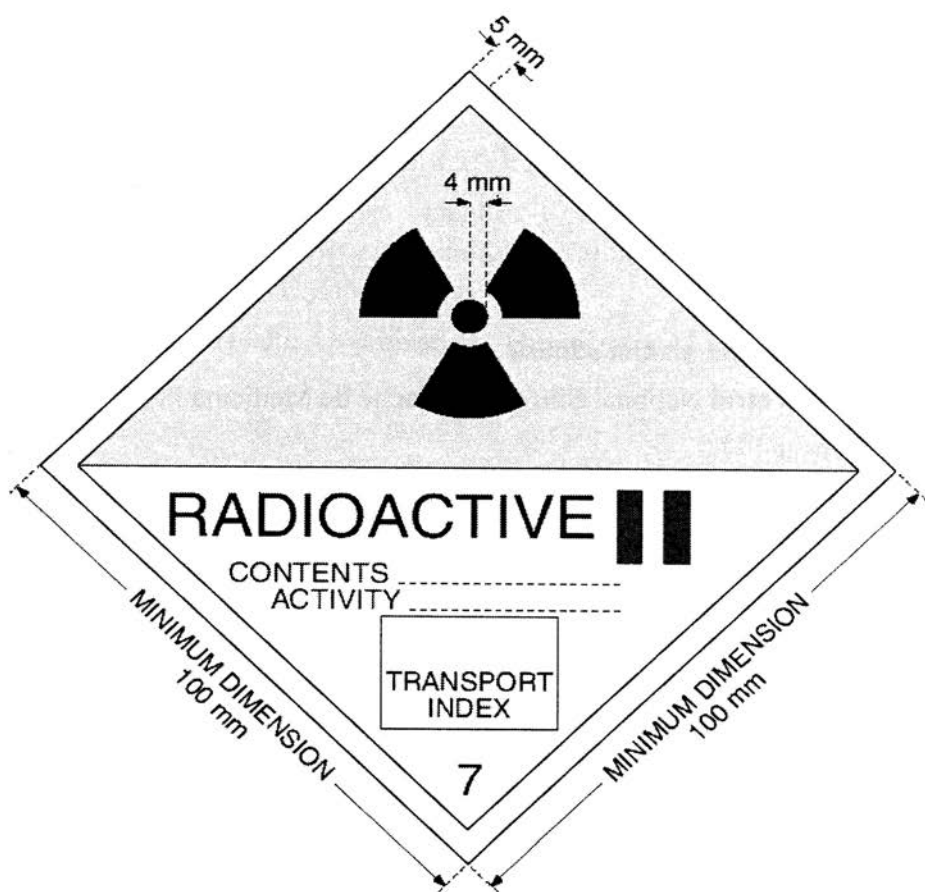


Fig. 118. Model de etichetă pentru marcarea resurselor.

ABREVIERI:

- A** – activitate
- ANC** – accident nuclear Cernobâl
- Be-7/10** – beriliu-7/10
- Bi-212** – bismut-212
- Bq** – Bequireli
- C- 14** – carbon-14
- CMA** – concentrația maxim admisă
- CNȘPMP** – Centrul Național Științifico-Practic de Medicină Preventivă
- Cs-137** – cesiu-137
- EEC** – concentrația echivalentă la echilibru
- EU** – European Union (Uniunea Europeană-UE)
- e** – electron
- E** – energia
- eV** – electron-volt
- Gy** – Gray
- IAEA** – International Atomic Energy Agency (Agenția Internațională pentru Energia Atomică – AIEA)
- ICRP** – International Commission on Radiological Protection (Comisia Internațională pentru Protecția Radiologică – CIPR)
- H-3** – hidrogen-3
- MeV** – mega electron-volt
- Na- 22/24** – sodiu – 22/24
- PDCANC** – participant la diminuarea consecințelor accidentului nuclear Cernobâl
- Pb -212/214** – plumb-212/214
- Po-214/218** – poloniu-214/218
- R** – roentgen
- Ra-226** – radium-226
- Rn-222** – radon-222
- Sr-90** – stronțiu-90
- Sv**- Zivert

TLD – dozimetre termo-luminescente

$T_{1/2}$ – timpul de înjumătățire

U-238 uraniu-238

UNO – United Nations Organization (Organizația Națiunilor Unite – ONU)

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee for Atomic Radiation Effects (Comitetul Științific al Organizației Națiunilor Unite privind Efectele Radiațiilor Atomice – CȘONUERA)

WHO – World Health Organization (Organizația Mondială a Sănătății – OMS)

GLOSAR

Accident – orice eveniment nepremeditat, inclusiv erorile în timpul exploatării, afectarea instalațiilor sau alte neajunsuri, ale căror consecințe reale sau potențiale nu pot fi neglijate din punctul de vedere al radioprotecției și securității nucleare.

Acid dezoxiribonucleic (ADN) – un polimer compus din dezoxiribonucleotide. Are forma de spirală dublă și este prezent în cromozomii din nucleolele celulei. Conține informația genetică.

Activitate(A) – raportul dintre numărul mediu al dezintegrărilor nucleare spontane preconizate, ce au loc într-o anumită cantitate de radionuclid cu o stare energetică determinată într-un interval scurt de timp și intervalul de timp respectiv:

$$A = \frac{dN}{dt}, \text{ unde}$$

dN – numărul mediu al dezintegrărilor nucleare spontane; dt – intervalul de timp (în secunde). Unitatea de măsură a activității este invers secunda (s^{-1}), numită Becquerel (Bq). Vechea unitate este Curie (Ci). $1 \text{ Ci} = 37 \times 10^9 \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$.

Activitate specifică(A_s) – raportul dintre activitatea totală și masa totală. Unitatea de măsură este Bq/kg.

Activitate volumică(A_v) – raportul dintre activitatea totală și volumul lui total. Unitatea de măsură este Bq/(m^3, l).

Apoptoză – moarte celulară izolată și programată, care încheie ciclul celular normal al unei celule și creează condiții fiziologice pentru înlocuirea sa.

Cariotip – harta cromozomilor.

Căi de expunere – căile prin care materialul radioactiv ajunge la/sau poate iradia, organismul uman.

Citopenie – diminuare patologică a numărului de celule dintr-o formație organică.

Concentrația Echivalentă la Echilibru a radonului (EEC) – concentrația activității radonului în echilibru cu descendenții săi de viață scurtă cu aceeași concentrație a energiei alfa-potențiale ca și amestecul lor la neechilibru, la momentul dat. Unitatea de măsură – $\text{Bq} \times m^{-3}$.

Concentrația energiei alfa – potențiale pentru un amestec de descendenți de viață scurtă ai radonului; este suma energiilor alfa potențiale ale atomilor de descendenți prezenți în unitatea de volum de aer. Unitatea de măsură $\text{J} \times m^{-3}$.

Contaminare radioactivă – contaminarea unui material, a unei suprafețe, a unui mediu oarecare sau a unei persoane cu substanțe radioactive, care include atât contaminarea externă, cât și contaminarea internă, indiferent de calea de încorporare.

Cromatină – substanța din nucleee, care conține informația genetică.

Decontaminare – eliminarea (îndepărtarea) materialelor radioactive de pe o oarecare suprafață sau dintr-un oarecare mediu, inclusiv și din organismul uman.

Deșeuri radioactive – materiale, articole, instalații și obiecte biologice în orice formă inutilizabile, care conțin sau sunt contaminate cu radionuclizi în concentrații superioare limitelor admise.

Debit de doză – raportul dintre doză (D, H, E, K) și durata expunerii, t [secundă (s), minut (min.), oră (h)]. Pentru toate aceste mărimi se definește și derivata în raport cu timpul – debitul kermei, debitul dozei absorbite, debitul expunerii, debitul dozei echivalente:

$$D = \frac{dD}{dt}, \left[\frac{W}{kg} \right] \text{ sau } \left[\frac{Gy}{s} \right], \quad \dot{K} = \frac{dK}{dt}, \left[\frac{W}{kg} \right] \text{ sau } \left[\frac{Gy}{s} \right]$$

$$\dot{X} = \frac{dX}{dm}, \left[\frac{A}{kg} \right], \quad \dot{H} = \frac{dH}{dt}, \left[\frac{Sv}{s} \right]$$

Debitul dozei absorbite – $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$, este derivata de timp a dozei absorbite. Unitatea de măsură – Gy \times s⁻¹.

Debitul expunerii – este definit: $\dot{X} \equiv \frac{dX}{dt}$ cu unitatea A kg⁻¹.

Dicentric – un cromozom, care conține două centre sau două centromere.

Doza absorbită (D) – mărimea medie a energiei radiației ionizante transmisă substanței.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}, \text{ unde}$$

$\bar{\epsilon}$ – energia medie, transmisă unei substanțe, aflată într-un volum elementar, dm – masa substanței în acest volum elementar. Unitatea de măsură este joule la kilogram (J/kg) și poartă denumirea de Gray (Gy). 1 Gy = 1J/kg, 1Gy = 100 rad. Unitatea este în relație directă cu efectele în materie. Nu este obligatoriu în relație directă cu intensitatea fasciculului de radiație.

Doza echivalentă ($H_{T,R}$) – valoarea definită prin formula:

$$H_{T,R} = D_{T,R} \times W_R, \text{ unde}$$

$D_{T,R}$ – doza absorbită de la radiațiile de tip R mediată pe organul sau țesutul T, W_R – factorul de ponderare pentru radiație R. Dacă câmpul de radiații este compus din mai multe tipuri de radiații cu diverse valori ale lui W_R doza echivalentă totală H_T este dată de relația:

$$H_{T,R} = \sum D_{T,R} \times W_R$$

Unitatea de măsură este J/kg, denumită Sievert (Sv): 1Sv = 1J/kg, 1 Sv = 100 rem.

Doza echivalentă angajată ($H_T(\tau)$) – la expunerea internă, valoarea definită prin formula:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(\tau) dt, \text{ unde}$$

t_0 – momentul încorporării, $\dot{H}_T(\tau)$ – debitul dozei echivalente în organul sau țesutul T în momentul de timp t, τ – perioada de încorporare a materialelor radioactive. Când intervalul de integrare τ nu este cunoscut, acesta se consideră ca o perioadă de 50 de ani pentru adulți sau $(70 - t_0)$ de ani pentru copii.

Doza efectivă (E) – produsul dintre suma dozelor echivalente ponderate în toate țesuturile și organele corpului și factorul de ponderare al țesutului respectiv.

$$E = \sum_T W_T \times H_T, \text{ unde}$$

H_T – doza echivalentă în țesutul sau organul T, W_T – factorul de ponderare pentru țesutul T. Unitatea de măsură este Sievert (Sv). Doza efectivă este doza echivalentă ponderată cu factorii de ponderare tisulari și sumată pentru toate organele radiosensibile. Este un indicator al iradierii întregului corp.

Doza efectivă angajată ($E(\tau)$) – la expunerea internă, valoarea definită prin formula:

$$E(\tau) = \sum_T W_T \times H_T(\tau), \text{ unde}$$

$H_T(\tau)$ – doză echivalentă angajată în țesutul T pe perioada de integrare τ , W_T – factorul de ponderare pentru țesutul T.

Doza efectivă colectivă – doza efectivă totală de iradiere pentru diferite grupuri expuse, definită prin formula:

$$S = \int_0^{\infty} \bar{E}_i \frac{dN}{dE} dE \quad \text{sau} \quad S = \sum_i \bar{E}_i N_i, \text{ unde:}$$

\bar{E}_i – doza efectivă medie pentru grupul de populație i , N_i – numărul de indivizi în grupă. Unitatea de măsură – om*sievert (om × Sv).

Doza efectivă cumulată pe intervalul de timp t este:

$$E_C = \int_0^t E(t) dt$$

Doza efectivă per capita – doza efectivă colectivă împărțită la întreaga populație (expusă și neexpusă). Folosește la compararea impactului în populație a diferitor surse de radiații. Reprezintă doza efectivă medie pentru o persoană ipotetică din populație. Unitatea de măsură – Sv.

Doza în organ sau țesut (D_T) – doza medie absorbită într-un anumit organ sau țesut T al corpului uman.

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int D \times dm, \text{ unde:}$$

m_T – masa organului sau țesutului, D – doza absorbită într-o unitate de masă dm. Unitatea de măsură, Sv (Sievert) = J × kg⁻¹.

Doza evitabilă – doza efectivă sau doza efectivă colectivă care ar putea fi micșorată printr-o acțiune de radioprotecție (diferența dintre doza angajată, dacă nu s-ar lua nicio măsură de radioprotecție, și doza angajată, dacă s-a efectuat vreo măsură de intervenție).

Doză genetică veridică – media calculată pentru doza gonadelor, primită de toată populația și utilizată pentru determinarea influenței genetice a dozelor mici asupra populației întregi.

Doza proiectată – doza efectivă sau doza efectivă colectivă care ar fi de așteptat într-un anumit caz, dacă nicio măsură de protecție sau remediere nu ar fi întreprinsă.

Echivalentul dozei ambientale ($H^*(d)$) – echivalentul dozei care s-ar fi putut produce într-un câmp de radiație orientat și extins respectiv, într-o sferă ICRU, la profunzimea d pe raza opusă direcției câmpului. Pentru radiații puternic penetrante $d = 10$ mm.

Echivalentul dozei personale ($H_p(d)$) – doza echivalentă în țesutul moale sub un punct specificat al corpului uman la adâncimea d , unde $d = 10$ mm pentru radiația puternic penetrantă și $d = 0,07$ mm pentru radiația ușor penetrantă.

Ecran pentru gonade – protejarea organelor reproductive de la expunerea la radiații.

Efecte deterministice – efectele rezultate în urma expunerii, pentru care exista un nivel prag al dozei, mai sus de care severitatea prejudiciilor va crește concomitent cu creșterea dozei.

Efectele precoce ale expunerii la radiații – răspunsul celulelor umane la radiații în câteva minute, zile sau săptămâni de la expunere.

Efect prodromal – primul stadiu al răspunsului la radiații: diareea, voma.

Efecte stocastice – efectele rezultate în urma expunerii, care nu au un nivel prag al dozei, probabilitatea apariției cărora este proporțională dozei, dar severitatea prejudiciilor nu depinde de doză.

Efectele tardive ale expunerii la radiații – răspunsul celulelor umane la radiații în câteva luni sau ani după expunere.

Efluent radioactiv – materiale radioactive evacuate în mediu sub formă de gaz, aerosol, materiale lichide și solide cu scop de diluare și dispersare.

Energie alfa-potențială a unui descendent al radonului – energia alfa totală emisă în timpul dezintegrării sale până la izotopul stabil. Unitatea de măsură – J.

Expunere – numărul de sarcini electrice produse de radiație în aer și se definește ca raportul:

$$X \equiv \frac{dQ}{dm}, \text{ unde:}$$

dQ este valoarea absolută a sarcinii electrice totale a ionilor de un singur semn, produși în aer, când toți electronii (negatroni și pozitroni) eliberați de fotonii Roentgen și gama în masa de aer dm sunt complet opriți în aer. Este relativ ușor de determinat. Se măsoară în C/kg – vechea unitate: Roentgen. $1 R = 2,58 \times 10^{-4} C/kg$. Expunerea este definită numai în aer și este cantitatea „primului impact”.

Expunere cronică – expunere ce persistă în timp după efectuarea intervenției celor ocupați profesional sau a publicului.

Expunere de urgență – expunerea cauzată de un accident (incident), care poate provoca o expunere excepțională a organismului.

Expunere externă – expunere a organismului provocată de o sursă de radiații aflată în exteriorul acestuia.

Expunere internă – expunere generată de o sursă de radiații aflată în interiorul organismului, care a pătruns prin inhalare, ingerare, injectare sau absorbție prin piele.

Expunere medicală – acțiune a fluxului de radiații ionizante asupra organismului uman în timpul efectuării diagnosticului și tratamentului medical, în cazurile participării benevole la investigațiile medico-biologice și acordării conștiente a ajutorului pacienților, aflați în procesul de diagnostic și/sau tratament.

Expunere naturală – acțiune a fluxului de radiație ionizantă asupra organismului uman de la sursele naturale de radiație ionizantă.

Expunere normală – expunerea, care va fi primită în condiții normale de exploatare a utilajului sau sursei inclusiv în cazul unei eventuale dereglări de funcționare, poate fi ținută sub control.

Expunere potențială – expunere, probabilitate a cărei apariție în condiții normale de utilizare a materialelor radioactive și a altor surse de radiații ionizante este mică, dar care poate apărea ca urmare a accidentului (incident, urgență), defectului aparatului utilizat și erorilor de operare.

Expunere profesională – expunere ce afectează angajații la locurile de muncă din obiectivele ce folosesc surse de radiații ionizante în condițiile autorizării legale a utilizării surselor.

Expunere tehnogenă – expunere de la sursele tehnogene, atât în condiții normale, cât și în caz de accident (incident), cu excepția expunerii medicale a pacienților.

Expunerea publicului – acțiunea asupra populației exercitată de la sursele de radiații ionizante, utilizate în activitatea practică și în situații excepționale (accidentale), cu excepția oricărei iradierii profesionale, medicale sau naturale.

Expus profesional – persoană supusă expunerii la radiații ionizante la locul de muncă ca urmare a activității profesionale sau persoană care poate fi supusă expunerii din cauza condițiilor de muncă.

Factor de echilibru (F) – raportul concentrației echivalente la echilibru a radonului la concentrația activității.

Factor de ponderare pentru radiație (W_R) – factor modificador care se aplică dozei în țesut sau organ și care reflectă dimensiunea detrimentului cauzat de expunerea la diferite tipuri de radiații. Factorul de ponderare pentru radiație caracterizează eficacitatea biologică a diferitor tipuri de radiații la inducerea efectelor asupra sănătății (*tabelul 39*).

Valorile factorului de ponderare pentru radiație (W_R)

Tipul și domeniul de energie	Factorul de ponderare pentru radiație (W_R)
Fotoni, toate energiile	1
Electroni și miuoni, toate energiile	1
Neutroni, energia până la 10 keV	5
de la 10 keV până la 100 keV	10
de la >100 keV până la 2 MeV	20
de la >2 MeV până la 20 MeV	10
mai mare de 20 MeV	5
Protoni, alții decât cei de recul, energie mai mare de 2MeV	5
Particule alfa, fragmente de fisiune, nuclee grele	20

Factorul de ponderare tisular (W_T) (tabelul 40) – reprezintă contribuția relativă a organului T la riscul total indus prin expunerea la radiații. Factorul de ponderare tisulară caracterizează sensibilitatea diferită a organelor sau țesuturilor organismului față de inducerea efectelor biologice produse de radiații.

În scopul efectuării de calcule, prin „restul organelor și țesuturilor” se înțeleg următoarele organe și țesuturi: glande suprarenale, creier, intestinul gros superior, intestinul subțire, rinichi, mușchi, pancreas, splină, timus și uter. Lista include organe pentru care este probabilă o iradiere selectivă. Se știe că unele organe din listă sunt susceptibile inducerii cancerului. Dacă alte țesuturi și organe vor fi identificate ulterior ca având un risc semnificativ pentru inducerea cancerului, atunci ele vor fi incluse fie cu un W_T specific în listă sau adăugate la restul organelor și țesuturilor. Restul organelor și țesuturilor poate include și alte organe și țesuturi iradiate selectiv. În situațiile excepționale, în care numai un singur țesut sau organ din restul organelor și țesuturilor primește o doză echivalentă în surplus față de cea mai mare doză în oricare din cele douăsprezece organe pentru care este specificat un factor de ponderare, trebuie aplicat un factor de ponderare de 0,025 pentru acel țesut sau organ și un factor de ponderare de 0,025 pentru doza medie în celelalte țesuturi și organe ale restului organelor și țesuturilor.

Valorile factorului de ponderare tisulară (W_T)

Țesut sau organ	Factor de ponderare tisulară (W_T)
Gonade	0,20
Măduvă osoasă hematopoietică	0,12
Colon	0,12
Plămâni	0,12
Stomac	0,12
Veziică urinară	0,05
Sâni	0,05
Ficat	0,05
Esofag	0,05
Tiroidă	0,05
Piele	0,01
Suprafața osoasă	0,01
Restul organelor și țesuturilor	0,05

Fluență (Φ) – raportul lui dN la da , unde dN reprezintă numărul de particule care intră în sfera de secțiune da :

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

Generator de radiații – utilaj capabil de a genera radiație, de exemplu razele X, neutroni, electroni sau alte particule cu sarcină, care poate fi utilizat în scopuri științifice, industriale și medicale.

Grup critic – un grup de persoane din populație, rezonabil de omogen cu privire la expunerea sa la o anumită sursă de radiații și o anumită cale de expunere, care primește cea mai mare doză efectivă (sau doza echivalentă, în dependență de caz) pe această cale de expunere și de la această sursă.

Încorporare – procesul de pătrundere în corp a radionuclizilor prin inhalare, ingestie sau absorbție prin piele.

Intervenție – măsurile direcționate spre prevenirea sau reducerea consecințelor nefavorabile ale accidentelor (incidentelor, urgențelor) radiologice aplicate către mediul ambiant și/sau către om, dar nu se referă la sursele de radiație ionizantă.

Kerma (K) – se referă la energia cedată de fascicul în elementul de masă considerat

$$K \equiv \frac{dE_{tr}}{dm},$$

în care dE_{tr} este energia cinetică transferată prin interacțiuni de către fotonii particulelor încărcate secundare (electroni). Interacțiunile fotonilor și eliberarea electronilor secundari au loc în elementul dm considerat, dar energia purtată de electronii secundari nu este cedată acolo decât parțial. Unitatea de măsură este joule la kilogram (J/kg) și poartă denumirea specială Gray [Gy]. KERMA (abreviere de la Kinetic Energy Released in Material, în continuare folosim kerma) și doza absorbită sunt legate de transferul energiei de la fasciculul (câmpul) primar de radiații către mediul iradiat. Kerma se referă la energia cedată de fasciculul în elementul de masă considerat. Doza absorbită ține seama de energia rămasă în elementul de masă.

Limită – mărimea valorii utilizată la desfășurarea activităților sau condițiilor definite indicate, care nu poate fi depășită.

Material radioactiv – orice material care conține radionuclizi a căror activitate sau activitate specifică nu poate fi neglijată din punctul de vedere al radioprotecției.

Măsurile de intervenție – acțiuni, care urmează a fi întreprinse pentru a evita sau a diminua nivelul de expunere a publicului în condițiile de expunere cronică sau accidentală.

Măsurile de remediere – acțiuni ce trebuie întreprinse în scopul reducerii dozei în cazul expunerii cronice când are loc majorarea nivelurilor stabilite de expunere.

Monitoring (monitorizare) – evaluarea sistematică a nivelului de doză și contaminare (poluare) pentru estimarea și controlul expunerii în urma acțiunii radiațiilor și a materialelor radioactive, inclusiv cu interpretarea rezultatelor evaluării (estimări).

Mutagenză – cauzarea mutațiilor genetice de către radiații.

Nivel de acțiune – nivelul debitului de doză sau activității specifice, la majorarea cărora în condițiile expunerii cronice sau accidentale se iau măsuri de remediere sau acțiuni de protecție.

Nivel de intervenție – nivelul dozei evitabile, la care se aplică acțiuni concrete de protecție sau măsuri de remediere în condițiile expunerii accidentale sau cronice.

Nivel de investigare – valorile mărimilor ca doză efectivă, încorporarea sau contaminarea pe o unitate de suprafață sau volum, la care sau superior căruia trebuie întreprinsă investigarea.

Nivel de înregistrare – nivelul dozei, expunerii sau încorporării, stabilit de organul public cu funcții de reglementare în domeniul radioprotecției și securității nucleare, de la care mărimea dozelor, expunerilor sau încorporărilor se introduc în registrele personale de expunere a lucrătorilor profesionali (Personal).

Nivel de referință – nivelul mărimii determinate, superior caruia este necesar de a analiza aplicarea măsurilor necesare.

Niveluri de eliberare de sub cerințele de autorizare (licențiere) – valori stabilite de organele publice cu funcții de reglementare în domeniul radioprotecției și securității nucleare, exprimate în termeni de activitate specifică și/sau de activitate totală la care și sub care sursele radioactive pot fi scutite de controlul regulatoriu.

Niveluri de exceptare – valori stabilite de organele publice cu funcții de reglementare în domeniul radioprotecției și securității nucleare exprimate în termeni de activitate totală și specifică, sub care practica este exceptată de la cerințele de autorizare.

Nuclid – atomul elementului, care se deosebește de alt atom prin numărul de protoni sau neutroni din nucleu.

Planul măsurilor în caz de accident (incident sau urgență) – complex de măsuri, prevăzut pentru intervenție, care va fi efectuat în caz de accident (incident sau urgență radiologică).

Planul măsurilor de remediere – complexul măsurilor de remediere, care vor fi efectuate în caz de iradiere cronică.

Practică – orice activitate umană la efectuarea căreia:

- se introduc surse de iradiere suplimentare sau se creează căi de expunere suplimentare ori
- se schimbă structura de expunere de la sursele existente, care duc la *majorarea expunerii, probabilității expunerii sau numărului persoanelor expuse.*

Profilaxie cu iod – saturarea cu iod stabil a glandei tiroide pentru excluderea asimilării iodului radioactiv.

Public (populație) – toate persoanele, inclusiv și personalul în afara activității profesionale cu surse de radiații ionizante.

Radiații ionizante – orice iradiere corpusculară sau electromagnetică capabilă să producă direct sau indirect ioni la trecerea prin substanță sau orice

radiație din următoarele: alfa, beta, gama, X, neutroni, electroni, protoni sau alte particule încărcate (cu excepția undelor radio, radiațiilor vizibile, infraroșii, ultraviolete, radiațiilor laser, ultrasunetelor, undelor electromagnetice de înaltă frecvență etc.).

Radioliză – interacțiunea radiațiilor cu apa.

Radiocarcinogeneză – cancerul produs de radiații.

Responsabil de radioprotecție – persoană cu pregătire și calificare corespunzătoare în domeniul radioprotecției și securității nucleare, numită prin ordin pentru efectuarea controlului executării cerințelor prezentelor norme vizând utilizarea surselor de radiație ionizantă.

Stocarea deșeurilor radioactive – depozitarea deșeurilor radioactive în depozite și locuri speciale, dacă nu este planificată utilizarea lor ulterioară.

Sursă deschisă – orice material radioactiv care în condiții normale de utilizare se poate răspândi, provocând contaminări.

Sursă închisă – orice material radioactiv încorporat într-un material nedispersabil sau închis într-un înveliș etanș, suficient pentru a împiedica orice dispersare a materialului radioactiv și orice posibilitate de contaminare.

Surse naturale – surse de radiații, existente în condiții naturale, inclusiv radiațiile cosmică și telurică.

Sursă de radiație ionizantă (SRI) – materiale, echipamente, dispozitive, instalații capabile să producă câmpuri de radiații ionizante.

Urgență radiologică – consecințele unui accident (incident) nuclear sau ale altei situații cu implicarea surselor de radiație ionizantă, care necesită o acțiune urgentă de protejare a persoanelor expuse profesional, a persoanelor din public sau a publicului, fie parțial, fie integral.

Zonă controlată – orice zonă în care există sau pot fi întreprinse măsuri specifice de protecție și siguranță pentru:

- a controla expunerile normale și a preveni răspândirea contaminării în condiții normale de lucru;
- a preveni și a limita extinderea expunerilor potențiale.

Zonă supravegheată – orice zonă, nedesemnată ca fiind zonă controlată, dar pentru care condițiile de expunere profesională trebuie ținute sub observație, chiar dacă, în mod obișnuit, nu sunt necesare măsuri specifice de protecție și siguranță.

DOZELE MEDII ANUALE DE IRADIERE A POPULAȚIEI, μ SV

Sursele	Doza medie globală	Diapazonul tipic
<i>Surse naturale</i>		
Iradierie cosmică		
Componenta ionizantă	280	
Componenta neutronică	100	
Radionuclizii cosmogeni(C-14 și alții)	12	
Suma	390	300-1000
Iradierie gama	480	300-600
Inhalare: ²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²³² Th ș.a. ²²² Rn și descendenții de viață scurtă a radonului	6	
²²⁰ Rn și descendenții de viață scurtă a toronului	1150	
	100	
Suma	1260	200-10 000
Ingestie cu alimentele și apa ⁴⁰ K	170	
²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²²⁸ Ra, ²²⁶ Ra	120	
Suma	290	200-800
Iradierie ocupațională sporită	2	
Total	2400	1000-10 000
<i>Surse artificiale (tehnogene)</i>		
Iradierie medicală	400	
Depuneri globale	5	
Iradierie profesională	0,5	
Teritorii poluate	2	
Deversări radioactive curente	< 0,2	
Total	400	0-1200
Din contul tuturor surselor	2800	1000-10 000

**NIVELE ADMISE ALE CONCENTRAȚIILOR MEDII ECHIVALENTE
DE ECHILIBRU AL RADONULUI (CMEER) ÎN DIFERITE ȚĂRI**

Țara	Concentrații medii echivalente de echilibru al Radonului, Bq/m ³		Notă
	Case existente	Case în construcție	
Recomandări CIRP	200	100	Propus în a.1986 Publicația 39 CIRP
Rusia	200	100	Introdus în a.1990. Măsuri antiradon sunt obligate în CMEER în 400 Bq/m ³
Suedia	100	100	Propus în a.1984 de Institutul Național de Radioprotecție. Măsuri antiradon sunt obligate în CMEER în 400 Bq/m ³
Finlanda	400	100	Primit în a. 1986, de Consiliul Național Medical
SUA (1)	200	-	Propus în a.1984 de Consiliul Național de Radioprotecție și Măsurări
SUA (2)	80	-	Propus în a.1986 de Agenția de Protecție a Mediului. Nivelul real este determinat de urgentarea măsurii.
Canada	400	-	Propus în a.1985 de Consiliul de Radioprotecție
Germania	200	-	Propus în a.1986 de Comisia de Radioprotecție
Marea Britanie	200	50	Propus în a.1987 de Consiliul Național de Radioprotecție
Ucraina	100	50	Primit în a.1992

BIBLIOGRAFIE

1. *Acta Nucleară&Radiologică*, Chişinău, 2009.
2. Bahnarel I., Coreţchi L., Moldovanu M. *Aspecte medico-biologice ale acţiunii accidentului nuclear de la Cernobîl asupra populaţiei Republicii Moldova*, Chişinău, Î.Ş.F.E.-P. „Tipografia Centrală”, 2005.
3. Chiosila Ion. *Radiaţiile si viaţa*, Editura Paco, Bucureşti, 1998.
4. Cember H. *Introduction to health physics*, 1983.
5. *Curs de Radioactivitate*. Editura Horia Holubei, 1997.
6. Forshier Steve. *Essential of Radiation Biology and Protection*, 2002.
7. James E. Martin. *Phisics for Radiation Protection*, WILEY-VCH, WEINHEIM, USA, 2004.
8. Khan F. *The physics of radiation therapy*, 1994.
9. Harrison Roy M. *Pollution Causes, Effects and Control*, Ed. The royal Society of Chemistry, London, 1994.
10. L'Annunziata Michael F. *Handbook of radioactivity analysis*. London, Great Britain, 2003.
11. Mellany Kenneth. *Waste and Pollution*, Editura Buttler and Tanner, Londra, 1992.
12. Metcalfe P.; Kron T.; Hoban P. *The physics of radiotherapy X-rays from linear accelerators*, 1997.
13. Mircea Oncescu, Iulian Panaitescu. *Dozimetria şi ecranarea radiaţiilor Roentgen şi gamma*, 1992.
14. Mircea Oncescu. *Conceptele Radioprotecţiei*, 1996.
15. Nodiţi M. *Citogenetica expunerii la radiaţii ionizante*. Timişoara, Helicon, 1999.
16. Roşca Andrei. *Imagistica medicală şi radioterapia pentru bioingineri*, Chişinău, 2009.
17. Steel Gordon G. *Basic Clinical Radiobiology*. London: arnold, 1997.
18. Shapiro Jacob. *Radiation Protection*, London, England, 2002.
19. Semenescu G., S.Răpeanu, T.Magda. *Fizică atomică şi nucleară*, 1983.
20. Tronto N, Bogdanova T. *The post Chernobyl incidence of childhood thyroid cancer in Ukraine*, Editura World Scientific Publishing, Singapore, 1999.
21. Williams J, Thwaites D. *Radiotherapy Physics*, 1993.
22. Consiliul National de Protectie Radiologică din Marea Britanie: *Trăim cu radiaţii*, traducere de A. Ionescu, Editura Tehnică, Bucureşti, 1989.

23. *Pollution and its containment*, Editura Thomas Teaford, Essex, 2000.
24. www.domino.kappa.ro/e-media/dimineata.nsf/
25. www.chernobyl.araxinfo.com/ecol13.htm
26. www.oecd.org/ehc/Waste/Index.htm
27. *Региональные образовательные курсы МАГАТЭ по радиационной защите и безопасности источников излучения*. Международный экологический университет им А.Д.Сахарова, Минск, 2001.
28. *Глоссарий МАГАТЭ по вопросам радиационной безопасности*, Вена, Австрия, 2007.
29. Романович И.К., Ромашова П.Г. Гигиенические аспекты облучения населения природными источниками ионизирующего излучения. Санкт-Петербург, 2008.
30. Bruno Comby. *Energia nucleară și mediul*. Editura TNR, București, 2001.
31. S.Mănescu, S.Dumitrache, M.Cucu. *Igiena*. București, 1991.
32. *Norme Fundamentale de Radioprotecție. Cerințe și Reguli Igienice*. NFRP-2000, nr. 06.5.3.34 din 27.02.2001.
33. *Recomandările Comisiei Internaționale de Protecție Radiologică din 1990 (ICRP, Publicația 60)*.

CUPRINS

Cuvânt înainte	3
Introducere	5

Partea I. BAZELE IGIENEI RADIAȚIILOR

Capitolul 1. Istoria descoperirii și dezvoltării tehnologiilor utilizării radiațiilor ionizante.....	7
---	----------

Capitolul 2. Aspecte fizico-chimice ale radiațiilor ionizante.....	10
2.1. Structura atomului	10
2.2. Structura protono-neutronică a nucleului	11
2.3. Caracteristici generale ale nucleului	14
2.4. Stabilitatea nucleelor atomice.....	15
2.5. Radioactivitatea, noțiuni de radioactivitate.....	17
2.6. Caracteristica familiilor radioactive	19
2.7. Serii radioactive	20
2.8. Tipuri de dezintegrare radioactivă	21
2.9. Proprietățile generale ale neutronilor.....	29
2.10. Legea fundamentală a dezintegrării radioactive	31
2.11. Spectrul electromagnetic	33

Capitolul 3. Interacțiunea radiațiilor cu substanța	34
3.1. Noțiuni generale	34
3.2. Procesele primare de interacțiune a radiațiilor ionizante cu substanța.....	36
3.3. Procesele secundare și atenuarea radiațiilor	43
3.4. Caracteristica generală a reacțiilor nucleare	44

Capitolul 4. Radiația Roentgen	49
4.1. Generalități	49
4.2. Interacțiunea radiațiilor Roentgen cu substanța	55
4.3. Sisteme de generare și detecție a radiațiilor Roentgen	60

Capitolul 5. Dozimetria și radiometria radiațiilor ionizante	62
5.1. Sarcinile dozimetriei	62
5.2. Metodele dozimetrice	64
5.3. Domeniile de aplicare a metodelor pentru măsurarea dozei și a debitului dozei	68
5.4. Aparate dozimetrice	70
5.5. Dispozitive cu corp solid pentru detectarea și măsurarea radiațiilor ionizante	75
5.6. Dozimetria termoluminescentă	82
5.7. Detectoare și semiconductoare	100
5.8. Detectoare cu scintilație	127

Partea II.

EPECTELE BIOLOGICE ALE RADIAȚIILOR IONIZANTE

Capitolul 6. Efectele biologice ale radiațiilor ionizante	133
6.1. Efectele biologice primare ale radiațiilor ionizante	133
6.2. Structura celulară	134
6.3. Acizi nucleici	147
6.4. Diviziunea celulară	148
6.5. Efectele biologice primare ale radiațiilor ionizante	161
6.6. Leziuni produse de radiațiile ionizante asupra moleculelor ADN ..	170
6.7. Radiosensibilitatea celulară	175
6.8. Procesele de reparație celulară	179
6.9. Apoptoza sau moartea programată a celulei	180
6.10. Efectele citogenetice ale radiațiilor ionizante	186
Capitolul 7. Toxicologia elementelor radioactive	196
7.1. Radiotoxicologia	196
7.2. Agentul radiotoxic	197
7.3. Deosebirea dintre radiotoxicitate și toxicitatea chimică	197
7.4. Caracteristicile agenților radiotoxici	197
7.5. Capacitatea de acceptare a agenților radiotoxici de către organismul uman	197
7.6. Etapele succesive ce permit estimarea „capacității de acceptare” pentru un anumit element radioactiv.	198

7.7. Factorii de care depinde toxicitatea radionuclizilor pătrunși în organismul uman	198
7.8. Clasificarea radiotoxicilor în conformitate cu gradul de toxicitate	198
7.9. Clasificarea radiotoxicilor în funcție de solubilitatea în mediul biologic	199
7.10. Căile de pătrundere a radionuclizilor în organismul uman și caracteristica lor	199
7.11. Comportamentul (repartizarea și metabolizarea) substanțelor radioactive în organismul uman	202
7.12. Eliminarea substanțelor radioactive din organismul uman	205

Capitolul 8. Efectele nestocastice (deterministice) ale radiațiilor ionizante 205

8.1. Caracteristica generală a efectelor nestocastice	205
8.2. Efecte asupra pielii și învelișului pilos	209
8.3. Boala actinică	211

Capitolul 9. Efectele stocastice (nedeterministice) ale radiațiilor ionizante 219

9.1. Caracteristica generală a efectelor stocastice	219
9.2. Efecte somatice	220
9.3. Efecte genetice	223
9.4. Efecte stocastice la descendenți	224
9.5. Efectele expunerii prenatale	225

Capitolul 10. Tipuri de relație doză-efect ale radiațiilor ionizante 226

10.1. Relația doză-efect pentru radiații cu TLE scăzut	226
10.2. Relația doză-efect a radiațiilor cu TLE ridicat	227
10.3. Eficacitatea biologică relativă (EBR) pentru radiațiile cu TLE ridicat și scăzut	228
10.4. Relația doză-efect în expunerea internă	228
10.5. Influența TLE asupra relației doză-efect în expunerea internă	229
10.6. Influența TLE al radiațiilor asupra complexității leziunilor ADN-ului	230
10.7. Relațiile doză-efect: Curbele supraviețuirii celulare	231
10.8. Metode de determinare a normelor de supraviețuire celulară	233
10.9. Clasificarea leziunilor celulare	234
10.10. Mediatorii acțiunii radiațiilor la nivel celular	235

Capitolul 11. Estimări de risc 236

Partea III.
REGLEMENTAREA IGIENICĂ A EXPUNERII ORGANISMULUI
UMAN LA RADIAȚII IONIZANTE

Capitolul 12. Noțiuni generale	241
12.1. Surse artificiale de radiații	242
12.2. Sursele naturale de radiații	245
12.3. Categoriile de persoane expuse la radiații ionizante.....	247
12.4. Clasificarea obiectivelor de construcție	248
Capitolul 13. Structurile de reglementare în domeniul radioprotecției și securității nucleare	249
13.1. Componentele infrastructurii din domeniul activităților nucleare și radiologice	249
13.2. Organele cu atribuții în domeniul activităților nucleare și radiologice.....	250
13.3. Legislația și actele normative în domeniul radioprotecției și securității radiologice și nucleare din Republica Moldova	250
13.4. Cadrul normativ internațional.....	255
Capitolul 14. Reglementarea expunerii profesionale la radiații ionizante de la sursele artificiale și naturale	257
14.1. Principiile generale de radioprotecție.....	257
14.2. Limitele dozelor de expunere.....	258
14.3. Contaminarea suprafețelor. Limite admisibile	260

Partea IV.
RADIOACTIVITATEA NATURALĂ

Capitolul 15. Componentele fondului radioactiv natural	263
15.1. Radiația cosmică	265
15.2. Radiația terestră	268
15.3. Radioactivitatea aerului atmosferic	271
15.4. Radioactivitatea naturală a solului	273
15.5. Radioactivitatea naturală a apei	275
15.6. Radioactivitatea naturală a vegetației.....	278
15.7. Radioactivitatea naturală a alimentelor.....	278
15.8. Radioactivitatea corpului uman	280

Capitolul 16. Radiațiile ionizante naturale ca factor habitual, mecanismele de acțiune, efectele nocive și măsurile de profilaxie	281
--	------------

Partea V.

RADIOACTIVITATEA ARTIFICIALĂ

Capitolul 17. Sursele artificiale de radiații ionizante	285
17.1. Principalele surse de poluare radioactivă	285
17.2. Caracteristica tipurilor de surse utilizate în Republica Moldova	288
17.3. Registrul Național de Notificare și Evidență a Surselor de radiații ionizante.	289
17.4. Principiile de eliberare a autorizațiilor pentru genul de activitate	290
17.5. Setul de documente necesare pentru exploatarea surselor de radiații ionizante	291
17.6. Autorizarea și avizarea sanitară activităților cu surse de radiații ionizante	292
17.7. Modalitățile de stocare temporară a surselor	293
Capitolul 18. Supravegherea sanitară preventivă a obiectivelor radiologice și nucleare	294
Capitolul 19. Supravegherea sanitară curentă a obiectivelor radiologice și nucleare	296
Capitolul 20. Utilizarea radiațiilor ionizante – beneficii și dezavantaje	297
Capitolul 21. Utilizarea radiațiilor nucleare în medicină	298
21.1. Utilizarea radiațiilor ionizante în radiodiagnosticul medical și radiologia intervențională	299
21.2. Radioprotecția pacientului	302
21.3. Pericolul procedurilor, intervențiilor radiologice pentru pacient	305
21.4. Controlul calității	306
21.5. Dozele de iradiere a pacienților	308
21.6. Utilizarea radiațiilor ionizante în radioterapie și brahiterapie	311

21.7. Radioterapia cu fascicul extern	312
21.8. Cerințele de securitate pentru stocarea și pregătirea surselor radioactive închise	314
21.9. Radioprotecția pacienților în radioterapie	316
21.10. Igiena muncii, principiile de radioprotecție la utilizarea surselor închise de radiații ionizante	316
21.11. Utilizarea radiațiilor ionizante în medicina nucleară.	318
21.12. Cerințe pentru amplasarea și amenajarea laboratoarelor destinate desfășurării practicii de medicină nucleară	319
Capitol 22. Utilizarea radiațiilor ionizante în agricultură, industrie . . .	324
22.1. Utilizarea radiațiilor ionizante în agricultură.	324
22.2. Iradierea produselor alimentare	326
22.3. Igiena muncii, principiile de radioprotecție.	330
22.4. Cerințe pentru amenajarea incintelor destinate desfășurării practicii de control nedistructiv cu radiații ionizante	332
Capitolul 23. Utilizarea radiațiilor ionizante în scopuri energetice. .	335
23.1. Energia nucleară și competitivitatea	335
23.2. Caracteristica reactoarelor utilizate și a procesului tehnologic de producere a energiei electrice	335
23.3. Centrale nucleare din UE și din lume	339
23.4. Energia nucleară și schimbările climatice	340
23.5. Radiațiile de la centralele nucleare	342
23.6. Igiena muncii, principiile de radioprotecție la stațiile atomo-electrice	342
Capitolul 24. Transportarea surselor și a deșeurilor radioactive. . . .	344
Capitolul 25. Stocarea surselor și a deșeurilor radioactive.	349
25.1. Deșeurile radioactive	349
25.2. Caracteristica procesului tehnologic de stocare a deșeurilor radioactive	353
25.3. Igiena muncii și radioprotecția personalului	355
25.4. Deversarea în mediu a substanțelor radioactive. Stocarea deșeurilor radioactive și protecția generațiilor viitoare . .	356

Partea VI.
ASPECTE ECOLOGICE ALE POLUĂRII MEDIULUI AMBIANT
CU RADIAȚII IONIZANTE

**Capitolul 26. Particularități de migrare a substanțelor radioactive
în mediul ambiant. 360**

SERII RADIOACTIVE

Fig. 114. Seria Uraniului 369
Fig. 115. Seria Thoriului 370
Fig. 116. Seria Neptunului 371
Fig. 117. Seria Actinouraniului 372
Tabelul 38. Sindroamele acute ale radiațiilor ionizante 373
Fig. 118. Model de etichetă pentru marcarea surselor 375
Abrevieri 376
Glosar 378
Anexa 1. Dozele medii anuale de iradiere a populației 389
Anexa 2. Nivele admise ale CMEER în diferite țări 390
Bibliografie 391