

Capitolul XI

CONCEPȚII MODERNE DESPRE ACȚIUNEA BIOLOGICĂ A IRADIERII IONIZANTE

Câteva luni mai târziu după descoperirea razelor X savantul rus I.P. Tarhanov a demonstrat că aceste raze au acțiune vădită asupra sistemului nervos și asupra celulelor sexuale ale broaștei.

Acțiunea deteriorantă a emanației sărurilor de radium asupra pielii a simțit-o asupra sa A. Becquerel. Primind în dar de la Pierre Curie o fiolă cu radium, el a purtat-o în buzunar timp de câteva ore. Ca rezultat, pe piele i-a apărut o hiperemie însoțită de prurit. Peste câteva zile hiperemia a trecut în ulceratie, care timp îndelungat nu se cicatriza.

Urmează apoi o studiere aprofundată a acțiunii iradiante asupra organismelor vii.

Apare o ramură nouă a științei – r a d i o b i o l o g i a. La dezvoltarea ei au contribuit savanții ruși M.O. Jukovski, E.S. London, A.I. Pospelov, N.N. Isacenko, D.E. Reșitillo.

Interacțiunea particulelor cu substanța

Particulele alfa și beta interacționează cu atomii substanței excitându-i sau smulgând electroni din sistemul atomic.

Se numește excitație atomică fenomenul de deplasare a electronilor de pe o orbită pe alta sub influența unei particule (sau cuante), fără ca vreunul dintre ei să părăsească atomul. Dacă din atomul neutru este smuls un electron sub acțiunea unei particule (în cazul dat alfa sau beta), partea rămasă se prezintă sub formă de ion cu sarcină pozitivă.

Pe locul electronului smuls de către energia particulei se deplasează un alt electron de pe o orbită mai îndepărtată. Acest fenomen este însoțit de emanarea unei porțiuni de energie caracteristică. Ionul cu sarcina negativă – electronul – își cheltuiește energia la ionizarea altor atomi. Afară de aceasta, ionii negativi și pozitivi în urma unui proces de recombinare se restabilesc în atomi neutri. Durata vieții ionilor este foarte scurtă (în mediu 10^{-6} secunde).

La procesul de formare a unei perechi de ioni în aer se cheltuiește energie egală în medie cu 3 eV. Energia inițială a particulelor purtătoare de sarcină (alfa și beta) de regulă e cu mult mai mare. De aceea ele creează în calea lor o cantitate enormă de ioni, cheltuindu-și treptat energia. Particula alfa se mișcă rectiliniu, având masă mare, energie și sarcină. Ca rezultat ea formează sute de mii de perechi de ioni, care se răspândesc de-a lungul traversei parcurse cu o densitate mare. La sfârșitul drumului particula alfa captează doi electroni și se transformă într-un atom de heliu.

Calea parcursă de particula β în substanță apare sub forma unei linii frânte, întortocheate. Având o masă foarte mică, ea ușor își schimbă direcția sub influența câmpurilor electrice atomice. În acest caz densitatea ionică a lor este mai mică decât a particulelor alfa. Spre sfârșitul drumului parcurs particula β este captată de atomii substanței.

Afără de particulele care poartă sarcină, există particule neutre – neutronii accelerați și lenți.

Neutronii accelerați își pierd energia în urma interacțiunii lor cu nucleele atomilor de hidrogen. La rândul lor, nucleele, primind o cantitate de energie cinetică, se rup din sistemul atomic și formează în substanță acumulări locale dense de ioni. Consumându-și energia, neutronii accelerați trec în *n e u t r o n i l e n ți* fiind captați de nucleele atomilor. O parte din nucleele atomilor, mai ales a atomilor de azot, se supun unui proces de fisiune cu emanare de protoni cu energii sporite și unui efect ionizant foarte exprimat. Nucleele unor atomi (mai ales ale celor de hidrogen) emană, după captarea neutronilor, gama cuante cu energie înaltă.

În sfârșit, o parte din nucleele atomilor de natriu, fosfor, clor, interacționând cu neutroni lenți se transformă în izotopi radioactivi.

Acest fenomen poartă denumirea de *radioactivitate secundară*. Să reținem că elementele enumerate mai sus se conțin în țesuturile organismului uman. Prin urmare, după o iradiere cu neutroni în organism se formează substanțe radioactive.

Deci, putem conchide că în rezultatul interacțiunii particulelor cu sarcină și neutre cu mediul are loc ionizarea și excitarea atomilor substanței.

Interacțiunea cuantelor cu substanța

Fasciculul de cuante (fotonic) slăbește pe măsura îndepărtării de sursa de radiație. Acest fenomen depinde în primul rând de factorul spațial: cu cât mai departe e sursa, cu atât mai mare e volumul supus difuziunii cuantice și cu atât mai puține cuante revin la o unitate de suprafață iradiată. Atenuarea spațială are loc după cunoscuta lege fizică: intensitatea radiației este invers proporțională cu pătratul distanței până la sursă.

Afără de aceasta, are loc interacțiunea directă a cuantelor cu atomii substanței.

Dacă cuantele posedă energie mică (5–10 KeV), interacțiunea lor cu atomii substanței are loc după mecanismul de *f o t o e f e c t*. O parte din energia cuantei se epuizează la ruperea electronului de pe orbita atomului, iar restul – pentru a-l accelera. Ca rezultat însăși cuanta dispăre, iar electronul expulzat din atom (așa-numitul fotoelectron) ionizează atomii din jur. Cu alte cuvinte acționează ca și particula beta.

La energii cuantice mai sporite, însemnătatea dominantă îi aparține difuziunii fotonilor atomilor (efectul Compton).

În aceste cazuri, o parte din energia cuantei se cheltuiește pentru a rupe electronul din atom, precum și pentru a-i comunica energie cinetică. Însuși fotonul se abate de la direcția inițială și își continuă mișcarea în mediu (este clar că energia lui este mai mică ca cea inițială). Electronul smuls de pe orbită la rândul lui ionizează atomii substanței.

La interacțiunea atomilor grei ai mediului cu fotonii ce au energia mai mare de 1,02 MeV, un rol important îl joacă procesul de formare a perechilor electroni-pozitroni. Fotonul, pătrunzând în câmpul electric paranuclear al atomului, dispare, dând naștere unei perechi de particule elementare electron-pozitron. Pozitronul pierde repede energia unindu-se cu electronul.

Ca rezultat ambele particule dispar (așa-numita anihilare), iar în locul lor apar doi fotoni, energia fiecăruia din ei fiind de două ori mai mică decât a fotonului primar. La rândul lor ei interacționează cu atomii mediului după mecanismele expuse mai sus.

În așa fel, fotonul, trecând prin substanță, formează numai o pereche de ioni în caz de fotoefect sau câteva perechi din contul smulgerii electronilor la difuziunea treptată. Fotoelectronii apăruți și electronii de emisie își cheltuiesc energia la ionizarea substanței condiționând mii de procese ionizante. Prin urmare, razele *X* și radiația gama, în special prin intermediul electronilor secundari, ionizează substanța prin care trec.

Reacțiile iradiante primare

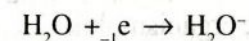
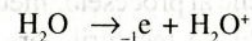
Teoria acțiunii indirecte

Iradieră penetrantă acționează, după cum a fost arătat mai sus, în același mod – transmițând energia sa atomilor substanței, ultimii se transformă în ioni sau atomi excitați (vezi mecanismele de interacțiune a particulelor și cuantelor cu atomii substanței). Ionii apăruți în urma ionizării atomilor și moleculelor, purtători de sarcini pozitive și negative, se deosebesc printr-o activitate chimică exprimată. Ei interacționează ușor cu moleculele neutre. Atomi excitați posedă o energie mai sporită în comparație cu energia inițială a atomului, prin urmare, activitatea lor chimică este pronunțată. Procesele de ionizare și excitare a atomilor sau a unor formații mai masive, biologic active, constituie mecanismul fizic care stă la baza inițierii efectului biologic. Ca rezultat apar dereglări ale legăturilor

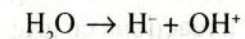
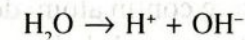
intramoleculare cu formarea unor produse foarte active, așa-numiții radicali liberi.

Luând în considerare că 65–70% din masa corpului revine mediului lichid – apei, este natural ca și schimbările inițiale ce apar să predomină în moleculele apei, care în urma ionizării se distrug, dând naștere radicalilor liberi.

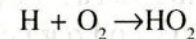
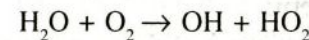
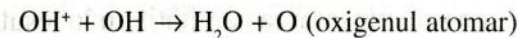
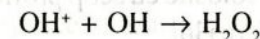
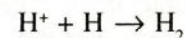
Așadar, prima fază a acestui proces o putem aprecia ca fază a interacțiunii fizice cu o durată de 10^{-12} s:



Mai departe procesul se caracterizează printr-o disociație intensă cu formarea radicalilor liberi:



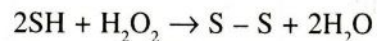
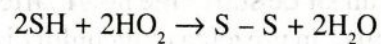
Faza a doua este numită *f a z a c h i m i c ă*. În urma unor reacții chimice apar un șir de substanțe noi, foarte active de tipul peroxizilor. În particular, în prezența oxigenului dizolvat în apă au loc următoarele reacții:



Prin urmare, ca rezultat al acțiunii radiației asupra apei apar radicali liberi – formații chimice cu capacități reactive sporite. Radicalii liberi interacționează între ei, formând molecule de apă, apă oxigenată și

superoxigenată. Începe faza a treia – de toxemie. Acest fenomen este bine exprimat în soluții diluate. Afară de aceasta în organism, în legătură chimică cu apa se găsesc toate substanțele organice care se supun unei agresiuni din partea radicalilor liberi, oxidând grupele active. Sub acțiunea radicalilor apei se denaturează moleculele de albumină, nucleoproteizi, fermenți etc. În urma așa-numitei acțiuni indirecte a iradierii ionizante asupra moleculelor biosubstratului apar substanțe biologice active străine organismului – histamina, serotonina, care dereglează mersul ciclic al proceselor metabolice. Prin urmare, aceste toxine afectează celulele, țesuturile, organele, în sfârșit, toate sistemele de autoreglare ale organismului.

Trebuie menționat un fenomen de o mare însemnătate. Diferite molecule concurează între ele pentru a se uni cu radicalii apei și radicalii organici, în așa fel apar alte molecule de oxidare. S-a constatat că substanțele care conțin atomi de sulf și grupele SH (cisteină, glutation) pot juca rolul de protectoare datorită posibilităților lor sporite de a reacționa cu grupele OH₂ și OH. După ipoteza lui Barron



Aceste substanțe pot fi folosite cu scop profilactic fiind introduse în organism înainte de iradierea lui.

Lipsa de oxigen sau micșorarea cantității lui în țesuturi scade acțiunea ionizantă a iradierii.

După faza de toxemie urmează faza a patra, de schimbări funcționale și morfologice (vezi manifestările deteriorărilor actinice).

Acțiunea radiației asupra celulei

Teoria acțiunii directe

Esența deteriorărilor iradiante ale celulelor constă în ruperea moleculelor albuminelor celulare, distrugerea structurilor celulare, dezorganizarea proceselor biochimice intracelulare, frânarea sintezei albuminelor și fermenților.

Acțiunea radiației se exprimă prin dereglările proceselor vitale celulare, afară de aceasta acționează asupra caracteristicilor acestor procese. În urma acțiunii radiației apare pervertirea reacțiilor chimice, legate de dereglări din partea mecanismelor de adaptare chemate să regleze mersul normal al proceselor biochimice în celule. Se dereglează metabolismul hidrocarburilor, lipidelor, albuminelor.

Un rol deosebit în organism îl joacă enzimele, care iau parte la metabolismul substanțelor celulare și sinteza metaboliților. Dirijează sinteza albuminelor și enzimelor acidul ribonucleic (ARN). La rândul ei această substanță este sintetizată de moleculele acidului dezoxiribonucleic (ADRN). Iradierea ionizantă acționează asupra structurilor nucleare multimoleculare ale ADRN (teoria acțiunii directe). Apar rupturi unice ca urmare a cărora se dereglează legătura între grupele de atomi ale unui fir molecular de ADRN. Rupturile duble – în două fire, duc la o dezorganizare totală a moleculei. Ele apar în lanțul moleculei ADRN în urma acțiunii directe a radiației și se termină cu deteriorări grave genetice și de sinteză ale ARN. Refacerea moleculelor ADRN după rupturile duble, de regulă, nu se observă. Frânarea procesului de sinteză a moleculei de ADRN se reflectă negativ asupra proceselor de restituire a unor fermenți și albumine.

Celula pierde însă numai atunci, când rezerva de fermenți se cheltuește până la sintetizarea unei noi molecule de ARN. O manifestare timpurie a iradierii este paralizarea proceselor de creștere și de mitoză a celulei. Pervertirea proceselor biochimice apare și ca urmare a acțiunii toxice asupra formațiilor celulare ale toxinelor apărute la radioliza apei.

În același timp sub acțiunea iradiației ionizante apare fenomenul de mutație cu dezorganizarea structurii ADRN și schimbări din partea caracteristicilor ereditare ale celulei. Cantitatea fenomenelor de mutație sub acțiunea iradiației crește brusc față de cele apărute în condiții naturale.

Caracteristicile schimbate ale celulei supuse iradiației se transmit prin ereditate, de regulă, ele duc la moartea celulei.

Dacă mutațiile substanțiale nu ating capacitățile vitale și de reproducere ale celulei, apar urmări anormale (cancerul iradiant, leucozele). La nivelul generațiilor care urmează pot apărea afecțiuni ereditare.

Până nu demult era răspândită teoria "țintei" – bazată pe noțiunile despre acțiunea indirectă a radiației ionizante asupra celulei. Această teorie presupune prezența în componența celulei a unor formațiuni cu o sensibilitate sporită – "ținte". Afectarea lor iradiantă duce la dereglarea metabolismului în celulă și la moartea ei. Conform acestei teorii celulele pier în urma acțiunii asupra lor a unor doze foarte mici, adică energia iradiantă ce acționează asupra acestor formațiuni, supunându-se legii probabilității, afectează aceste componente radiosensibile.

Luând în considerare diferențierea intracelulară, teoria presupune că apariția în sectoarele sensibile a unor schimbări sunt reacții la acțiunea directă asupra legăturilor intermoleculare în formațiile moleculare ale albuminei. Însă savanții n-au descoperit în componența celulei așa formațiuni care ar putea juca rolul "țintei". Cu toate că această teorie are un șir întreg de neajunsuri, unii savanți consideră că există posibilitatea acțiunii directe a iradiației asupra unor formațiuni din celula cu o sensibilitate mai sporită.

Factorii de care depinde gravitatea efectului biologic

Unul din factorii mai importanți de care depinde gravitatea efectului biologic este doza iradiației și puterea dozei.

Iradieria locală se suportă mai ușor decât cea generală.

Efectul biologic depinde de natura factorului ionizant (particulă, cuante).

Deteriorările actinice depind de radiosensibilitatea individuală și reactivitatea generală a organismului în timpul iradierii.

Radiosensibilitatea organismului în temeii, este cu atât mai înaltă, cu cât mai compusă este organizarea organismului.

Radiosensibilitatea și radiodeteriorarea organismului

Toate ființele vii sunt radiosensibile.

În general, radiosensibilitatea obiectului biologic crește pe măsura avansării organizării biologice a lui. Mamiferele se deosebesc prin cea mai înaltă radiosensibilitate.

În urma interacțiunii iradiației ionizante cu organismul în structurile lui apar reacții fiziologice, deteriorări și procese de compensație. Din acest punct de vedere radiosensibilitatea și radiodeteriorarea organismului sunt noțiuni, sensul cărora nu coincid. Reacția fiziologică a retinei ochiului broaștei la acțiunea iradiantă se manifestă deja la doza de 0,001 R. Astfel, se înțelege, că radiosensibilitatea retinei este foarte mare. Radiodeteriorările retinei ochiului broaștei se pot descoperi numai după acțiunea dozei de 1000 R. Prin urmare, radiodeteriorarea retinei este relativ joasă.

Radiosensibilitatea și radiodeteriorarea organismului viu sunt noțiuni alternative. Ele depind, în primul rând de stadiul dezvoltării organismului, de starea lui în momentul iradierii, adică de starea sistemului nervos, activitatea funcțională a aparatului endocrin și intensitatea metabolismului bazal etc. Starea funcțională a organelor interne (ficatului, rinichilor, glandei tiroide, sistemului cardiovascular) condiționează rezistența la iradiere.

Radiosensibilitatea diferențiată a organelor și țesuturilor

Toate organele și țesuturile organismului animal sunt radiosensibile, însă în componența aceluiași organism și chiar organ, țesuturile și celulele sunt supuse afecțiunii în urma iradierii deteriorante cu o intensitate diferită.

Care este cauza radiosensibilității diferențiate ale celulelor și țesuturilor?

Până în prezent nu-și pierde însemnătatea legea formulată de Borgonie și Tribondo încă în anul 1906: "Razele X acționează cu atât mai intensiv, cu cât activitatea de reproducere a celulelor este mai avansată, cu cât perioada de mitoză a lor este mai lungă și cu cât mai puțin este predeterminată funcția și morfologia lor". Cu alte cuvinte, radiosensibilitatea țesuturilor la iradiere este direct proporțională cu intensitatea proceselor de mitoză ale celulelor și invers proporțională cu gradul de diferențiere.

Radiosensibilitatea organelor și țesuturilor nu este un indice constant. Ea depinde de starea organismului și mai ales de acțiunea condițiilor înconjurătoare (temperatură, conținerea de oxigen și apă etc.). Mai sensibile sunt celulele care în momentul iradierii lor se găsesc într-o stare funcțională activă (mai ales în perioada de sinteză a ADN).