

RADIOBIOLOGIJA SA RADIJACIONOM HIGIJENOM



Branislava Mitrović

Beograd, 2021.

**RADIOBIOLOGIJA SA
RADIJACIONOM HIGIJENOM**

Branislava Mitrović

Beograd, 2021.

Branislava Mitrović
RADIOBIOLOGIJA SA
RADIJACIONOM HIGIJENOM
Beograd, 2021.

Recezeni:

dr Jelena Ajtić, redovni profesor
dr Vladimir Kukolj, vanredni profesor
dr Dragana Todorović, naučni savetnik

Odlukom Nastavno-naučnog veća Fakulteta veterinarske medicine u Beogradu, na 217. sednici održanoj 23.06.2021., rukopis je odobren za izdavanje kao osnovni udžbenik za predmet Radiobiologija sa radijacionom higijenom (odluka br. 01-394/5 od 23.06.2021.) i namenjen je studentima pete godine na studijskom programu Integrisane akademske studije Univerziteta u Beogradu, Fakulteta veterinarske medicine.

Tehnički urednik:

dr Branislava Mitrović

Izdavač:

Autor

Elektronsko izdanje

ISBN - Narodna biblioteka Srbije, Beograd

MITROVIĆ, Branislava, 1973 - Radiobiologija sa
radijacionom higijenom/ Branislava Mitrović, 2021 (Beograd)
- 107 str. Bibliografija: str. 100-107.

ISBN-978-86-920303-1-4

SADRŽAJ

1. JONIZUJUĆE ZRAČENJE I RADIOAKTIVNOST – KRATAK PREGLED	5
1.1. Naučne discipline u oblasti radioaktivnosti i jonizujućih zračenja	7
2. JONIZUJUĆA ZRAČENJA I RADIOAKTIVNOST	9
2.1. Radioaktivnost, radioaktivni raspad i period poluraspada	9
2.2. Vrste radioaktivnog raspada.....	10
2.2.1. Alfa raspad	11
2.2.2. Beta raspad	12
2.2.3. Gama raspad	13
2.2.4. Neutronske i protonsko zračenje	14
2.2.5. Spontana fisija	14
2.3. Interakcija jonizujućeg zračenja sa materijom	15
3. DOZIMetriJA I DETEKCIJA ZRAČENJA	17
3.1. Dozimetrijske veličine i jedinice	18
3.2. Dozimetrija u radioekologiji	21
3.3. Detekcija jonizujućih zračenja.....	22
3.3.1. Jonizacioni detektori.....	22
3.3.2. Scintilacioni i termoluminiscentni detektori.....	23
4. JONIZUJUĆA ZRAČENJA U ŽIVOTNOJ SREDINI.....	25
4.1. Prirodni izvori jonizujućeg zračenja	25
4.1.1. Kosmičko zračenje	26
4.1.2. Zemljišno zračenje	27
4.1.2.1. Prirodni radionuklidi u lancu ishrane	30
4.1.3. Povišena prirodna radioaktivnost u životnoj sredini.....	31
5. PROIZVEDENI IZVORI JONIZUJUĆEG ZRAČENJA	32
5.1. Medicinska upotreba jonizujućeg zračenja	32
5.2. Nuklearne probe i korišćenje nuklearnog oružja	35
5.3. Akcidenti na nuklearnim postrojenjima.....	35
5.4. Industrijska primena jonizujućeg zračenja i radioizotopa.....	36
5.5. Odlaganja radioaktivnog otpada u životnu sredinu	36
6. RADIOAKTIVNA KONTAMINACIJA ŽIVOTNE SREDINE PROIZVEDENIM RADIOAKTIVNIM ELEMENTIMA	38

6.1. Radioaktivna kontaminacija atmosfere	38
6.2. Radioaktivna kontaminacija geografskih voda	40
6.3. Radioaktivna kontaminacija zemljišta	41
6.4. Radioaktivna kontaminacija biljaka	41
6.5. Radioaktivna kontaminacija životinja i ljudi	42
7. TOKSIČNOST RADIONUKLIDA	44
7.1. Biološki značajni radionuklidi	46
7.1.1. Radiocezijum	46
7.1.2. Radiostroncijum	47
7.1.3. Radiojod	48
8. RADIOBIOLOGIJA I	50
8.1. Teorija direktnog dejstva zračenja na živu materiju	51
8.2. Teorija indirektnog dejstva zračenja na živu materiju	51
8.3. Oštećenja na nivou ćelija izazvana zračenjem	52
8.3.1. Dejstvo zračenja na nukleinske kiseline	53
8.3.2. Mutacije i hromozomske aberacije	55
8.3.3. Dejstvo zračenja na proteine i enzime	56
8.3.4. Dejstvo zračenja na lipide	57
8.3.5. Dejstvo zračenja na ugljene hidrate	57
9. RADIOBIOLOGIJA II	58
9.1. Reparacija radijacionih povreda	59
9.2. Smrt ćelija izazvana zračenjem	60
9.3. Efekti zračenja na organizam	61
10. RADIOPATOLOGIJA I	65
10.1. Radijacione povrede	65
10.2. Reakcija zdravog tkiva na zračenje	67
10.2.1. Hematopoezni i limforetikularni sistem	67
10.2.2. Gonade	68
10.2.3. Digestivni trakt	69
10.2.4. Koža	69
10.2.5. Respiratorni sistem	69
10.2.6. Kardiovaskularni sistem	70

11. RADIOPATOLOGIJA II.....	71
11.1. Akutni radijacioni sindrom životinja.....	71
11.1.1. Akutni radijacioni sindrom goveda	74
11.1.2. Akutni radijacioni sindrom konja	75
11.1.3. Akutni radijacioni sindrom svinja.....	75
11.1.4. Akutni radijacioni sindrom pasa	76
11.2. Kasne promene	76
12. RADIOPATOLOGIJA III	77
12.1. Radiološko trovanje ili akutni radijacioni sindrom izazvan internom kontaminacijom životinja.....	77
12.2. Hronični radijacioni sindrom.....	79
12.3. Radijacione opekotine	80
12.3.1 Beta opekotine.....	81
12.4. Udružene radijacione povrede	82
13. ZAŠTITA ŽIVOTINJA I STOČARSKE PROIZVODNJE U VANREDNOJ RADIOLOŠKOJ SITUACIJI.....	83
13.1. Preventivne mere zaštite	83
13.2. Mere zaštite u srednjoj i kasnoj fazi radioaktivne kontaminacije životne sredine.....	84
14. ZAKONSKA REGULATIVA I.....	88
14.1. Zaštita ljudi i životinja u situacijama postojećeg i planiranog izlaganja zračenju.....	89
14.2. Zaštita ljudi i životinja u situaciji vanrednog izlaganja zračenju.....	91
15. ZAKONSKA REGULATIVA II.....	94
15.1. Zaštita životne sredine.....	94
15.2. Monitoring radioaktivnosti životne sredine.....	95
15.3. Dekontaminacija zemljišta, namirnica životinjskog i biljnog porekla i hrane za životinje	96
15.1.1. Radioaktivna dekontaminacija zemljišta.....	96
15.1.2. Radioaktivna dekontaminacija namirnica životinjskog porekla	97
15.1.3. Radioaktivna dekontaminacija namirnica biljnog porekla.....	98
15.1.4. Radioaktivna dekontaminacija hrane za životinje.....	99
16. LITERATURA	100

Predgovor

Udžbenik *Radiobiologija sa radijacionom higijenom* je namenjen studentima osnovnih i poslediplomskih studija iz oblasti veterinarske medicine, ali ga kao dodatnu literaturu mogu koristiti i studenti drugih srodnih nauka. Knjiga je nastala kao rezultat višedecenijskog rada autora sa studentima, kao i rada u oblasti zaštite od jonizujućih zračenja u akreditovanoj Laboratoriji za radijacionu higijenu, Fakulteta veterinarske medicine u Beogradu.

Cilj ovog udžbenika je da se studenti upoznaju sa načinima i putevima dospevanja radioaktivnih elemenata u životnu sredinu, njihovom migracijom kroz karike lanca hrane, osnovama biološkog dejstva jonizujućeg zračenja i radiopatologije, kao i merama koje se sprovode u cilju zaštite životinja i profesionalno izloženih lica od jonizujućih zračenja i radioaktivne kontaminacije.

U periodu intezivnih nuklearnih proba, od 1945. pa sve do 1980. godine, veliki broj istraživanja je bio usmeren na proučavanje dejstva jonizujućeg zračenja na žive organizme. Značaj zaštite životinja i poljoprivredne proizvodnje u vanrednim radiološkim situacijama prepoznat je posle nuklearnog akcidenta koji se dogodio u Černobilju, tadašnjem Sovjetskom Savezu, 1986. godine. Uloga veterinara u zaštiti stanovništva od radioaktivne kontaminacije proizvodima životinjskog porekla je ključna karika u očuvanju javnog zdravlja. Takođe, ne manje značajna uloga veterinara je i obezbeđivanje dobrobiti životinja koje su u vanrednim situacijama obično prepuštene same sebi, o čemu svedoče podaci iz Fukušime, Japan, posle havarije na nuklearnoj elektrani 2011. godine.

Pojedine savremene metode u veterinarskoj medicini koriste izvore jonizujućeg zračenja u dijagnostici i terapiji bolesti životinja. Jonizujuće zračenje ponekad može izazvati štetne efekte u živom organizmu. Nastali štetni efekti mogu biti nuspojava ili komplikacija radijacione terapije, dok u vanrednim radiološkim situacijama nastaju kao posledica akcidentalnog ozračivanja životinja. U ovakvim situacijama doktori veterinarske medicine treba da prepoznaju nastale promene i da životinjama obezbede adekvatnu negu i lečenje. Pored toga, doktori veterinarske medicine koji u svom svakodnevnom poslu koriste izvore jonizujućih zračenja pripadaju grupi profesionalno izloženih lica i zato treba da budu upoznati sa zakonskim propisima iz oblasti zaštite od jonizujućih zračenja.

Nadam se da će udžbenik iz Radiobiologije sa radijacionom higijenom pomoći studentima da sagledaju ovu složenu problematiku, što će obezbediti primenu svih mera zaštite od jonizujućih zračenja, kako u redovnoj, tako i u vanrednoj radiološkoj situaciji.

U knjizi je umesto pojma jonizujuće zračenje korišćen termin zračenje, koji obuhvata jonizujuća elektromagnetna (X i gama zračenje) i čestična zračenja.

Autor

1. JONIZUJUĆE ZRAČENJE I RADIOAKTIVNOST - KRATAK PREGLED

Radioaktivnost i jonizujuće zračenje (u daljem tekstu samo zračenje) prisutni su od samog formiranja planete Zemlje i sastavni su deo našeg okruženja. O postojanju ovih prirodnih fenomena nije se znalo sve do kraja XIX veka. Otkriću radioaktivnosti prethodilo je otkriće iks (X) zraka. Vilijam Konrad Rendgen (1845-1923), nemački fizičar, 1895. godine je otkrio X zrake koji su kasnije, pošto je objašnjena njihova priroda, po njemu nazvani rendgenski zraci. Danas se ova dva naziva u nauci, medicini i svakodnevnom životu, koriste kao sinonimi. Izučavanjem X zraka bavio se i Nikola Tesla koji je do 1897. godine objavio deset naučnih radova o X zracima.

Proučavajući rad profesora Rendgena naučnik Anri Bekerel (1852-1908), francuski fizičar, 1896. godine otkrio je radioaktivnost. Bekerel je smatrao da postoji veza između luminiscencije i emisije prodornog, do tada nepoznatog zračenja, i da materijali koji postaju luminiscentni posle izlaganja sunčevoj svetlosti mogu i sami da emituju zračenja. Da bi dokazao pojavu luminiscencije uranijumove rude Bekerel je izveo eksperiment. Na fotografsku ploču uvijenu u crni papir postavljao je kristale uranijumovih soli i sve zajedno je izlagao sunčevoj svetlosti. Rezultati ovih istraživanja su pokazali da sunčeva svetlost i luminiscencija nisu bile potrebne da fotografska ploča pocrni na mestu gde su bili kristali uranijuma, već da sami kristali uranijuma emituju nevidljivo zračenje. Tako je Bekerel otkrio radioaktivnost.

Dve godine posle Bekerelovog otkrića, hemičar Gerhard Karl Šmit (1864-1949) je objavio da i hemijski element torijum može da isprazni elektroskop ili da potamni fotografsku ploču. Ovo otkriće je potvrdila i mlada Poljakinja Marija Kiri (1867-1934) koja je zajedno sa suprugom Pjerom Kiri (1859-1906) započela istraživanja na izdvajanju uranijuma iz pehblende. Rezultati istraživanja su pokazali da ruda sadrži i druge radioaktivne elemente koji su aktivniji i od samog uranijuma. Zajedno sa hemičarom Gustavom Bemonom (1867-1932) supružnici Kiri su 1898. godine iz pehblende (rude uranijuma) izolovali novi element koji intenzivno zrači, sličan bizmutu, koji je Marija u čast svoje domovine Poljske nazvala polonijum. Ubrzo su otkrili i drugi radioaktivni element čije su hemijske osobine bile slične barijumu i nazvali su ga radijum. Za ovo otkriće supružnici Kiri su zajedno sa Bekerelom 1903. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziku. Pjer Kiri, sa već izraženim simptomima radijacione bolesti, tragično je nastradao 1906. godine. Marija Kiri je nastavila sa daljim istraživanjima kojima je uspela da izdvoji elementarni radijum u metalnom obliku. Za ovo otkriće je 1910. godine dobila Nobelovu nagradu za hemiju i postala prva žena koja je dobila Nobelovu nagradu i prva osoba koja je dva puta dobila ovo ugledno priznanje.

Ernest Raderford (1871-1937), novozelandski fizičar, 1899. godine je započeo izučavanje nepoznatog zračenja koje emituje uranijum i ustanovio je da to zračenje čine dve

vrste čestica. Jednu vrstu čestica je nazvao alfa (α) česticama, a drugu beta (β) česticama. Pol Vilard (1860-1934), francuski hemičar i fizičar, je 1900. godine u uzorcima radijuma otkrio još prodorniju vrstu zračenja, koje je Raderford nazvao gama (γ) zračenjem. Raderford je istraživanja izvodio sa Frederikom Sodijem (1877-1956), engleski radiohemičar, i 1903. godine ova dva naučnika su objasnila prirodu radioaktivnosti.

Zasluga za otkriće veštačke radioaktivnosti pripada supružnicima Frederiku Žoliju (1900-1958) i Ireni Kiri (1897-1956), ćerki Marije i Pjera Kirija, koji su lake hemijske elemente izlagali zračenju od jakog izvora polonijuma. Ovim eksperimentom utvrdili su da aluminijum i bor mogu veštačkim putem da postanu radioaktivni. Za ovo otkriće su 1935. godine dobili Nobelovu nagradu za hemiju.

Vrlo brzo po otkriću X zračenja započinje njihova primena u medicini. U okviru kraljske ambulante u Glazgovu, Škotska, doktor Džon Makintajer (1857-1928) je u januaru 1896. godine osnovao prvo bolničko odeljenje za radiologiju. Tokom 1896. godine Džon Makintajer je publikovao osamnaest radova o mogućnostima korišćenja rendgen aparata u medicini. Već 1896. godine kod radiologa u Velikoj Britaniji i Nemačkoj zabeležena su oštećenja na rukama, na koži i oko noktiju, za koje se kasnije utvrdilo da su posledica nekorišćenja zaštitne opreme pri radu sa rendgen aparatima.

Godinu dana nakon otkrića X zraka (1896. godine) američki elektroinženjer Volfram Fučs (1865-1908) je izneo prve preporuke za upotrebu rendgen aparata koje su glasile: ekspozicija treba da bude što kraća, razmak između cevi rendgen aparata i pacijenta treba da bude najmanje 30 cm, i izložena mesta na koži premazivati vazelinom. Ovim je Volfram Fučs postavio tri osnovna načela zaštite od zračenja: vreme - rastojanje - prepreke. O štetnim efektima X zraka izveštavao je i Nikola Tesla koji je 1897. godine objavio da su mu X zraci prouzrokovali „šok za oči“ i da se od njih razboleo. Utvrdio je da se postavljanjem ploča od tankog aluminijumskog lima ili mreže od aluminijumske žice između cevi i osobe koja se snima smanjuje rizik od nastanka povreda, kao i to da intezitet zračenja opada sa rastojanjem od izvora zračenja.

Otkriće radijuma nije prošlo nezapaženo. Ljudi su bili fascinirani njegovim „magičnim osobinama“, naročito sposobnošću luminiscencije kada se pomeša sa fosforom. Pokrenuta je proizvodnja velikog broja proizvoda koji su u sebi sadržali radijum, kao što su tonici za kosu, kreme za lice, paste za zube, voda za piće i slično. U periodu od 1917-1926. godine jedna firma u SAD-u je angažovala više od stotinu devojaka čiji je posao bio da premazuju bročtanike na satovima mešavinom sulfida cinka i radijuma. Devojke su vlažile četkicu tako što su je stavljale u usta. U kasnijim godinama života kod ovih devojaka se razvilo oboljenje nazvano „radijumska čeljust“, a kod četrdeset devojaka došlo je do smrtnog ishoda usled pojave kancera.

U Londonu je 1925. godine održan prvi međunarodni kongres radiologa na kom je razmatrana potreba za formiranjem komiteta za zaštitu od zračenja. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (*ICRP, eng. International Commission on Radiological Protection*) osnovana je u Stokholmu 1928. godine i danas predstavlja međunarodnu organizaciju čije preporuke usvajaju druga međunarodna i nacionalna tela, kao što su: Međunarodna agencija za atomsku energiju (*IAEA, eng. International Atomic Energy Agency*), Organizacija za hranu i

poljoprivredu Ujedinjenih nacija (*UN FAO eng. Food and Agriculture Organization of the United Nations*) i Svetska zdravstvena organizacija (*WHO, eng World Health Organisation*).

Prvi Pravilnik o merama zaštite pri radu sa rendgenskim uređajima i radioaktivnim materijama, u Federativnoj Narodnoj Republici Jugoslaviji, donet je 1947. godine, a 1959. godine i Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja. U bivšoj Socijalističkoj Federativnoj Republici Jugoslaviji je 1965. godine usvojen Osnovni zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja. Zaštita od jonizujućeg zračenja je bila u nadležnosti Savezne komisije za nuklearnu energiju, Saveznog zavoda za zdravstvenu zaštitu i Saveznog komiteta za zdravstvenu i socijalnu zaštitu. Savezni komitet za zdravstvenu i socijalnu zaštitu je u periodu od 1970-1987. godine rezultate merenja radioaktivnosti u životnoj sredini izdavao jednom godišnje u publikaciji „Radioaktivnost životne sredine u Jugoslaviji“.

U Republici Srbiji je 2009. godine osnovana Agencija za zaštitu od zračenja i nuklearnu sigurnost u cilju obezbeđivanja uslova za kvalitetno i efikasno sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja i mera nuklearne sigurnosti pri obavljanju radijacionih delatnosti i nuklearnih aktivnosti. Agencija je 2018. godine promenila naziv u Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije.

Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja osnovano je 11. oktobra 1963. godine u Portorožu za vreme održavanja Jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti. Društvo je 1969. godine postalo punopravni član Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (*ICRP*). U periodu od 1972-2003. godine društvo menja naziv u Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja, da bi 2005. godine dobilo ime, koje i dan danas nosi, Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore.

1.1. Naučne discipline u oblasti radioaktivnosti i jonizujućih zračenja

Otkriće radioaktivnosti i zračenja podstaklo je razvoj više naučnih disciplina, od kojih su se kao posebne discipline izdvojile: radiobiologija, radioekologija, radijaciona zaštita, detekcija i dozimetrija zračenja i radijaciona higijena.

Radiobiologija je naučna disciplina koja izučava efekte jonizujućeg zračenja na živa bića.

Radioekologija je multidisciplinarna naučna oblast koja objedinjuje saznanja iz fizike, hemije, biologije, geologije, veterine i drugih nauka, a u cilju proučavanja:

- načina dospevanja radioaktivnih elemenata u životnu sredinu i njihovu migraciju kroz lanac hrane,
- efekata jonizujućeg zračenja, naročito malih doza, na biljke, životinje i ekosistem, i
- udruženih efekata jonizujućeg zračenja i drugih zagađivača prisutnih u životnoj sredini (teški metali, pesticidi, herbicidi, itd.) na populacije biljaka i životinja, odnosno na ekosistem u celini.

Radijaciona zaštita je naučna oblast koja na osnovu podataka o nivou radioaktivnosti i dozi zračenja u radnoj ili životnoj sredini, a na osnovu zakonske regulative, daje preporuke

za sprovođenje odgovarajućih aktivnosti i mera pomoću kojih se radijaciona opasnost otklanja ili smanjuje na minimum.

Dozimetrija predstavlja skup instrumentalnih i teorijskih metoda kojima se meri i proračunava energija koju zračenje predaje materiji kroz koju prolazi. Detekcija zračenja je instrumentalna metoda koja se bavi otkrivanjem prisustva jonizujućeg zračenja i radioaktivnih supstanci u životnoj sredini.

Radijaciona higijena je naučna oblast koja proučava puteve dospevanja i migraciju radioaktivnih elementa kroz lanac hrane (zemljište - biljke - čovek; zemljište - biljke - životinje - čovek; voda - riba - životinje; voda - riba - čovek). U vanrednim radiološkim situacijama, radijaciona higijena se bavi zaštitom životinja i poljoprivredne proizvodnje od radioaktivne kontaminacije i donošenjem preporuka o upotrebljivosti radioaktivno kontaminirane vode, hrane i hrane za životinje.

Značaj radijacione higijene ogleda se u redovnim i u vanrednim radiološkim situacijama. U redovnoj situaciji, monitoringom radioaktivnosti utvrđuje se sadržaj radionuklida u životnoj sredini i lancu ishrane. Dobijeni rezultati predstavljaju tzv. „nulto stanje“, i služe kao osnova za procenu stepena kontaminacije životne sredine u slučaju nuklearnih akcidenata ili eksplozija.

U vanrednim radiološkim situacijama veterinarska služba ima veoma značajan ulogu u zaštiti životinja i njihovih proizvoda od radioaktivne kontaminacije i ozračivanja. Primenom odgovarajućih mera zaštite domaćih životinja i poljoprivredne proizvodnje, radioaktivni elementi se mogu isključiti iz lanca ishrane.

2. JONIZUJUĆA ZRAČENJA I RADIOAKTIVNOST

Jonizujuća zračenja i radioaktivni elementi su prirodno prisutni u životnoj sredini i dovode do kontinuiranog ozračivanja svih živih bića. Pod pojmom *zračenje* podrazumeva se prenos energije u vidu elektromagnetnih talasa ili čestica. U naučnim disciplinama koje proučavaju jonizujuća zračenja i radioaktivnost, umesto džula kao merne jedinice za energiju, koristi se elektronvolt (eV). Elektronvolt se definiše kao kinetička energija koju slobodni elektron u vakuumu primi prolaskom kroz potencijalnu razliku od jednog volta ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Pojam *ozračivanje* podrazumeva izlaganje zračenju.

Na osnovu energije zračenja, ona se mogu podeliti na nejonizujuća i jonizujuća zračenja. U grupu nejonizujućih zračenja spadaju sva elektromagnetna zračenja čija je energija manja od 12 eV: radio-talasi, mikrotalasi, infracrveno zračenje, svetlost i ultravioletna zračenja nižih energija.

Jonizujuća zračenja su talasna i čestična zračenja koja poseduju energiju dovoljnu da prolaskom kroz neku sredinu stupe u interakciju sa njenim česticama, i dovedu do stvaranja *jonskih parova* (jonizacija). U grupu talasnih jonizujućih zračenja ubrajaju se visokoenergijski elektromagnetni talasi – X i *gamma* zračenje (kao i visokoenergijsko ultravioletno zračenje koje nije predmet u ovom kursu) – dok *alfa*, *beta*, *neutronska* i *protonska* zračenje pripadaju grupi čestičnih jonizujućih zračenja.

Specifična jonizacija je merilo jonizacione moći čestičnog zračenja i predstavlja broj stvorenih jonskih parova po centimetru pređenog puta.

2.1. Radioaktivnost, radioaktivni raspad i period poluraspada

Radioaktivnost je fizička pojava u kojoj se atomsko jezgro spontano transformiše uz emisiju jonizujućeg zračenja. **Radionuklidi** (radioaktivni elementi, radiozotopi) su nestabilni hemijski elementi koji podležu radioaktivnom raspadu.

Radioaktivni raspad je spontani proces transformacije putem kojeg jezgro nestabilnog atoma prelazi u energijski stabilno ili stabilnije stanje, uz emisiju čestice ili elektromagnetnog zračenja. Novonastalo jezgro ne mora da bude stabilno, u kom slučaju podleže daljem radioaktivnom raspadu.

Aktivnost radioaktivnog izvora (A) predstavlja brzinu raspada, tj. broj radioaktivnih raspada koji se u izvoru dogodi u jedinici vremena (sekundi):

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

gde je ΔN broj raspadnutih jezgara u vremenu Δt .

Jedinica za aktivnost je bekerel (Bq), gde 1 Bq predstavlja jedan raspad u sekundi. Jedinica za aktivnost koja se ranije koristila je kiri (Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ raspada/sekundi} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

Radioaktivni raspad je slučajni događaj i njegova brzina, tj. aktivnost, vezana je za verovatnoću raspada datog radionuklida. Verovatnoća raspada zavisi od prirode jezgra i data je konstantom radioaktivnog raspada (λ)¹. Radioaktivnim raspadom nekog radioaktivnog elementa nastaju njegovi *potomci*, koji mogu biti stabilni ili nestabilni. Na primer, radioaktivnim raspadom ¹³⁷Cs, koji predstavlja *roditelja ili pretka*, nastaje njegov stabilni *potomak* ¹³⁷Ba.

Period poluraspada, odnosno fizičko vreme poluraspada ($T_{1/2}$), veličina je koja takođe opisuje brzinu raspada nekog radionuklida i izražava se u jedinicama za vreme (sekundama, danima ili godinama). Definiše se kao vreme potrebno da se broj nestabilnih jezgara smanji na polovnu početne vrednosti. Period poluraspada obrnuto je proporcionalan konstanti radioaktivnog raspada. Drugim rečima, što je λ veće, veća je verovatnoća raspada, a period poluraspada je kraći. Na osnovu perioda poluraspada za radioaktivne elemente zato kažemo da su kratkoživeći, srednje ili dugoživeći elementi. Smatra se da se neki radionuklid raspao posle deset perioda poluraspada, odnosno kada od početnog broja jezgara ostane hiljaditi deo.

Biološko vreme poluraspada ($B_{1/2}$) predstavlja vreme za koje se iz organizma, procesima sekrecije i ekskrecije, eliminiše polovina od ukupno unetog broja radionuklida. Biološko vreme poluraspada zavisi od vrste radionuklida i fiziološkog stanja organizma i nezavisno je od fizičkog perioda poluraspada

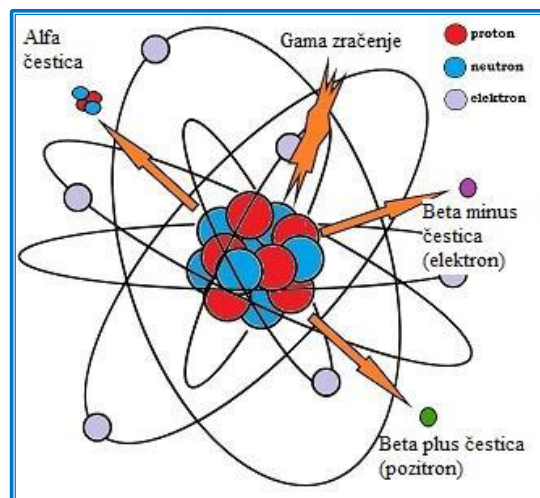
Efektivno vreme poluraspada ($E_{1/2}$) predstavlja vreme koje je potrebno da se aktivnost nekog radionuklida deponovanog u organizmu svede na polovinu kombinovanim dejstvom biološke eliminacije i radioaktivnim raspadom. Izračunava se na sledeći način:

$$E_{1/2} = \frac{T_{1/2} \cdot B_{1/2}}{T_{1/2} + B_{1/2}}$$

2.2. Vrste radioaktivnog raspada

Radioaktivnim raspadom nestabilna jezgra prelaze u stabilnija ili stabilna jezgra, emitujući pri tome jonizujuće zračenje u vidu čestica ili elektromagnetnih talasa. Osnovne vrste radioaktivnog raspada su: alfa (α) i beta (β) raspad i gama (γ) zračenje (slika 1). Takođe i spontana fisija predstavlja vrstu radioaktivnog raspada.

¹Konstanta radioaktivnog raspada (λ) je poznata za svaki radioaktivni element i govori kolika je verovatnoća raspada radioaktivnog jezgra u funkciji vremena. Na primer, ako je za dati radionuklid, konstanta radioaktivnog raspada $\lambda = 10^{-1}/s$, to znači da će se svake sekunde raspasti 10% prisutnih jezgara datog radionuklida.



Slika 1. Alfa, beta i gama zračenje.

Zbog velike primene u medicini u ovom poglavlju biće opisano i protonsko (p^+) i neutronsko (n) zračenje.

2.2.1. Alfa raspad

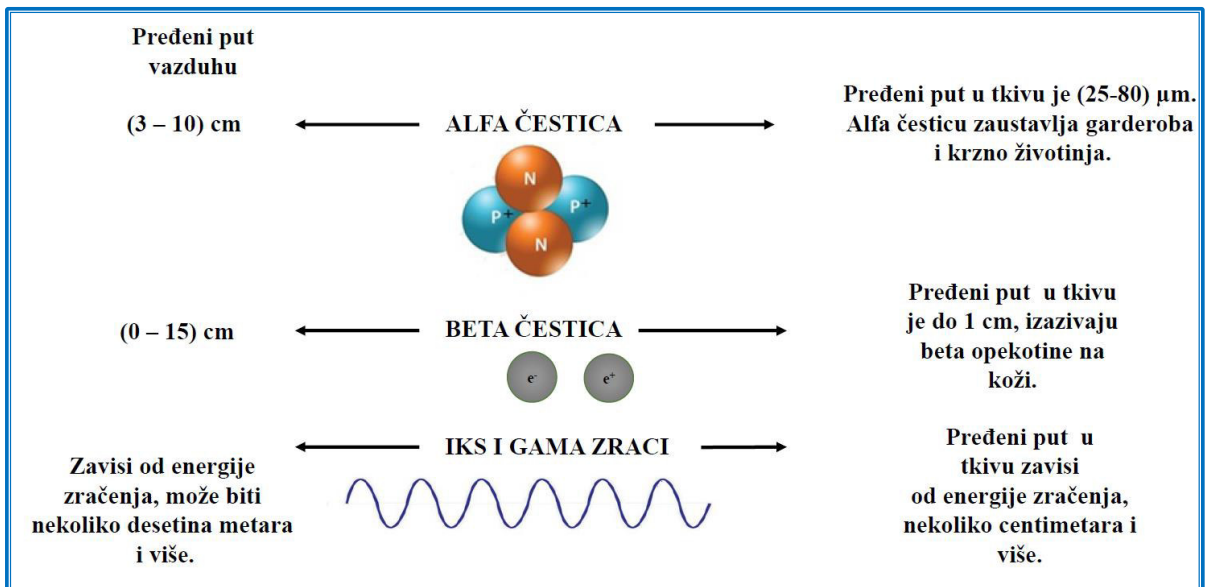
Alfa raspad predstavlja vid transformacije radioaktivnog jezgra pri kojoj se iz jezgra emituje *alfa čestica* sastavljena od dva protona (p^+) i dva neutrona (n). Emitovana čestica predstavlja jezgro atoma helijuma (${}^4_2\text{He}$).

Radioaktivni elementi koji emituju alfa čestice nazivaju se *alfa emiteri*. Elementi koji se mogu naći u prirodi, a čiji je redni broj veći od 82 su alfa emiteri (${}^{212}_{84}\text{Po}$, ${}^{227}_{90}\text{Ac}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$ i drugi).

Osnovne karakteristike alfa čestica su:

- velika energija u rasponu od 1,5 MeV do 11 MeV,
- energija alfa čestice koju emituje neki radioaktivni element uvek je ista,
- mala brzina kretanja kroz vazduh (oko 20 000 km/s), kratak domet² i mala prodornost,
- domet u vazduhu je od 3 cm do 10 cm, čestice ne prodiru kroz list papira, odeću i krzno životinja, u tkivima im je domet od 25 μm do 80 μm (slika 2),
- velika specifična moć jonizacije (30000-100000 jonskih parova po centimetru pređenog puta).

²Domet predstavlja put koji čestica zračenja date početne energije pređe u nekom materijalu duž određenog pravca do potpunog zaustavljanja.



Slika 2. Domet različitih vrsta jonizujućih zračenja.

Radioaktivni elementi koji podležu alfa raspadu ne predstavljaju rizik po živa bića kada se nalaze van organizma. Opasnost po zdravlje ljudi i životinja nastaje ukoliko se alfa emiteri unesu u organizam putem inhalacije ili ingestije.

2.2.2. Beta raspad

Beta raspad je najčešći način dezintegracije nestabilnih atomskih jezgara kod kojih odnos broja protona i neutrona nije najpovoljniji. Postoje tri tipa beta raspada: beta negativni raspad, beta pozitivni raspad i elektronski zahvat.

Beta negativni raspad (β^-) nastaje kada u radioaktivnom jezgru ima višak neutrona u odnosu na broj protona, zbog čega dolazi do transformacije neutrona u proton. U ovom raspadu iz jezgra se emituje negativna beta (β^-) čestica, koja je zapravo elektron. Prvo teorijski, a zatim i eksperimentalno, pokazano je da se u ovom raspadu osim elektrona emituje još jedna elementarna čestica, antineutrino.

Osnovne karakteristike β^- čestica su:

- energija emitovanih čestica (β^- i $\bar{\nu}$) nije uvek jednaka, zbog čega beta negativna čestica nema konstantnu energiju, već može imati bilo koju energiju od nulte do maksimalne,
- velika brzine kretanja (oko 280 000 km/s) i mala masa,
- domet u vazduhu je do 15 m, u tkivima do 1 cm (slika 2),
- specifična moć jonizacije je 100 jona/cm pređenog puta.

Beta pozitivan raspad (β^+) se dešava kod nestabilnih jezgara kod kojih postoji višak protona u odnosu na broj neutrona, pa se proton u jezgru transformiše u neutron i β^+ česticu. Ova čestica je pozitron-ima istu masu kao elektron i naelektrisanje koje je jednako naelektrisanju elektrona, ali suprotnog predznaka (tj., pozitivno). Kao i u beta negativnom raspadu, ovde se emituje još jedna čestica, neutrino.

Vreme života pozitrona (β^+ čestica) je veoma kratko. On nestaje u procesu *anihilacije*³ koji je praćen *anihilacionim zračenjem*. Prolazeći kroz materiju, pozitron gubi kinetičku energiju u interakciji sa česticama materije, i tako usporava. Kad se praktično zaustavi i nađe u blizini elektrona, svoje antičestice, obe čestice nestaju uz emisiju dva fotona, svaki energije od 511 keV, a koji se prostiru u suprotnom smeru.

Domet β^+ čestice je kratak, zaustavlja je metal debljine veće od 3 mm, drvo debljine 6 mm, u tkivima im je domet do 1 cm (slika 2). U prirodi su beta pozitivni emiteri retki. U medicini se beta pozitivni emiteri koriste za dijagnostiku malignih bolesti i metastaza. Pozitronski emiteri se za potrebe pozitronske emisije tomografije sa kompjuterizovanom tomografijom (PET/CT) proizvode u ciklotronima i akceleratorima⁴, tako što se stabilni izotopi elemenata izlažu naelektrisanim česticama.

Treći tip beta raspada naziva se **elektronski zahvat** i dešava se u jezgrima koja imaju veći broj protona nego neutrona. Stabilnost jezgra se postiže tako što proton zahvata elektron iz atomskog omotača i transformiše se u neutron. Pri ovom zahvatu iz jezgra se emituje samo neutrino.

Prilikom ove transformacije najčešće se zahvata elektron iz najbliže K-ljuske, zbog čega se često elektronski zahvat zove i K-zahvat. Posle elektronskog zahvata na datoj orbitali ostaje upražnjeno mesto koje potom popunjava udaljeni elektron sa višeg energijskog nivoa, a višak energije emituje se u vidu karakterističnog X zračenja. Merenjem emitovanog X zračenja može se detektovati i ovaj tip beta raspada.

2.2.3. Gama raspad

Gama raspad predstavlja spontanu transformaciju atomskog jezgra u kojoj se oslobađa elektromagnetno zračenje (slika 1). Do emisije gama zračenja obično dolazi posle alfa ili beta raspada čime se eksitirano jezgro oslobađa viška energije i prelazi u stabilnije ili stabilno stanje. Gama raspadom ne nastaju promene u sastavu atomskog jezgra (ne menjaju se maseni ni redni broj), već se iz jezgra emituju elektromagnetni talasi velike energije (visoke frekvencije, tj. male talasne dužine).

Gama zračenje je kratkotalasno elektromagnetno zračenje, velike energije (od 10 keV do 3 MeV) i veoma velike prodornosti (slika 2). Za zaštitu od gama zračenja koriste se olovo debljine od 5 cm do 10 cm i beton debljine od 30 cm do 60 cm. Specifična jonizacija gama zračenja je vrlo mala i iznosi oko 1 jon/cm pređenog puta.

³Anihilacija (od latinskog *nihil* - ništa) označava proces u kojem se čestica (npr., pozitron) sudara sa svojom antičesticom (elektronom) i čestice nestaju, ali se emituje energija koja je nazvana anihilaciono zračenje.

⁴Ciklotroni i akceleratori su uređaji u kojima se naelektrisane čestice (elektroni, protoni) i jezgra lakih elemenata ubrzavaju dejstvom elektromagnetnog polja.

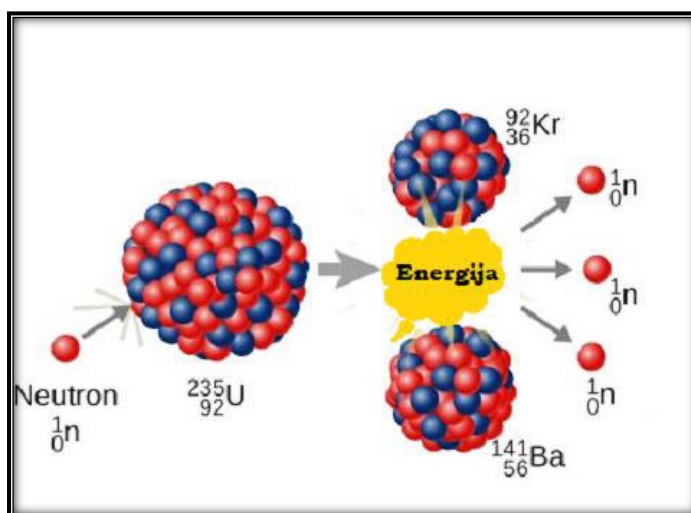
2.2.4. Neutronska i protonsko zračenje

Neutronska zračenje predstavlja snop neutrona. Neutroni nisu naelektrisani, pa lako prodiru do jezgra. U sudaru sa jezgrom dolazi do izbijanja drugih čestica (protona, alfa čestica, ili emisije elektromagnetnog zračenja) koje zatim vrše sekundarnu jonizaciju. Stepenn jonizacije zavisi od sredine kroz koju neutroni prolaze. Neutronska zračenje nastaje i u nuklearnim reaktorima tokom lančane fisije jezgara teških elemenata.

Protonsko zračenje predstavlja snop protona. Ima veliku primenu u radijacionoj onkologiji gde se za terapijske potrebe, u ciklotronima i akceleratorima, protoni (p^+) ubrzavaju do energije terapijskog raspona od 70 MeV do 250 MeV. Specifična jonizacija protonskog zračenja je oko 10^4 jona/cm pređenog puta.

2.2.5. Spontana fisija

Fisija je proces transformacije nekog teškog elementa (npr. izotopi uranijuma), prilikom apsorpcije neutrona, u kojem se atomsko jezgro cepa na dva lakša nejednaka jezgra koja se nazivaju fisioni fragmenti (slika 3). U nuklearnim reaktorima odvija se indukovana fisija gde se koriste slobodni neutroni za izazivanje procesa fisije. Na taj način se odvija tzv. lančana reakcija.



Slika 3. Šematski prikaz fisije jezgra ^{235}U .

Fisija je uvek praćena oslobađanjem velike energije koju nose fisioni fragmenti u vidu kinetičke energije, slobodnih neutrona i gama fotona. Spontana fisija se retko dešava u prirodi.

2.3. Interakcija jonizujućeg zračenja sa materijom

Način na koji zračenje interaguje sa materijom zavisi od vrste zračenja, veličine i mase čestice, energije zračenja, kao i sastava materije. Prolaskom kroz materiju, naelektrisane čestice (alfa čestice, elektroni, pozitroni, protoni, laki i teški joni) stupaju u interakciju sa elektronima i atomskim jezgrima i dovode do **direktne jonizacije materije**. Za razliku od čestičnog zračenja fotoni elektromagnetnog zračenja (X i gama) izazivaju **indirektnu jonizaciju materije** tako što prvo stupaju u interakciju sa elektronom, kojem predaju energiju dovoljnu da elektron napusti atom i vrši dalju jonizaciju materije.

Interakcija naelektrisanih čestica (α i β čestice) i materije sastoji se od niza sudara u kojima dolazi do razmene energije.

Ekscitacija nastaje kada zračenje preda elektronu energiju koja nije dovoljna da on napusti atom, već samo da pređe na orbitalu višeg energijskog nivoa. Posle vrlo kratkog vremenskog perioda atom se deekscituje, odnosno elektron se vraća na svoju orbitalu, a višak energije elektrona emituje se u vidu elektromagnetnog zračenja.

Jonizacija atoma je proces odvajanja elektrona od atomskog omotača. Naime, elektron u ovom slučaju dobija dovoljnu energiju da se odvoji od jezgra, i postane slobodan elektron. Stoga, kao posledica jonizacije atoma nastaju jonski parovi: negativno naelektrisan elektron i pozitivno naelektrisan atom (jon). Elektrone koji su izbačeni iz atoma usled sudara sa naelektrisanom česticom nazivamo primarnim elektronima. Primarni elektroni mogu imati dovoljno energije da vrše dalju jonizaciju materije. Elektroni koje izbace primarni elektroni, nazivaju se sekundarnim elektronima.

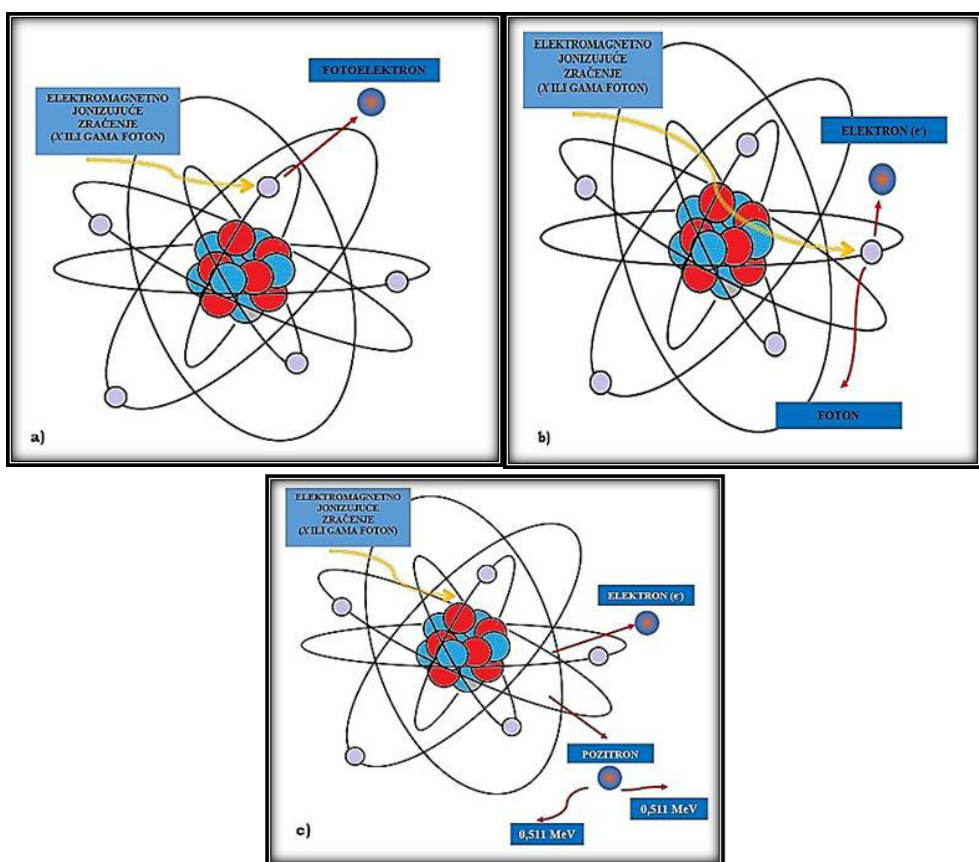
Neutroni kao *elektroneutralne čestice* ne dovode do direktne jonizacije sredine kroz koju prolaze, već reaguju samo sa atomskim jezgrima.

Interakcija jonizujućeg elektromagnetnog zračenja i materije odvija se kroz tri procesa: fotoelektrični efekat, Komptonovo rasejanje i stvaranje parova (slika 4).

Fotoelektrični efekat je pojava koja nastaje kada foton elektromagnetnog zračenja preda svu svoju energiju elektronu i potpuno nestane.

Komptonovo rasejanje (rasejano zračenje) je pojava karakteristična za interakciju elektromagnetnog zračenja i slabo vezanih elektrona, obično na spoljnim orbitalama. Nastaje kada je energija upadnog zračenja znatno veća od energije veze elektrona, pa foton prenosi deo svoje energije na elektron koji napušta atom, a foton skreće sa svoje putanje. Skretanje fotona je veće što je veći deo energije izgubljen.

Stvaranje parova je proces pri kojem se elektromagnetno jonizujuće zračenje visoke energije (1,02 MeV i više), prolazeći sasvim blizu jezgra, transformiše u par pozitron (e^+) i elektron (e^-). Stvaranje parova je uvek praćeno anihilacijom nastalog pozitrona sa nekim elektronom iz okoline, pri čemu se emituje dodatno elektromagnetno zračenje (sekundarno – anihilaciono zračenje).



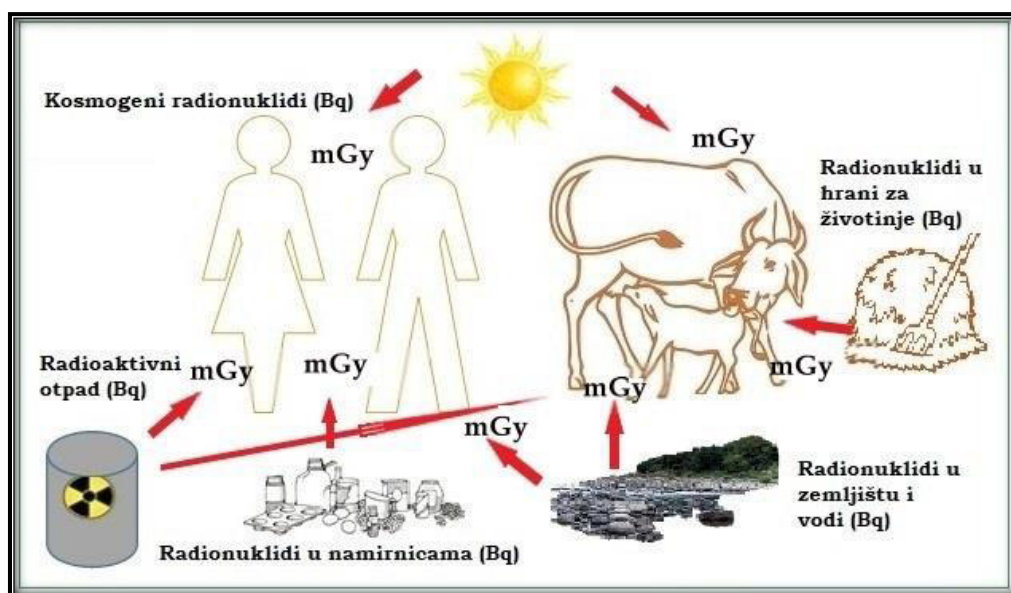
Slika 4. Šematski prikaz interakcije fotona elektromagnetno jonizujućeg zračenja sa atomom materije: a) fotoelektrični efekat; b) Komptonovo rasejanje; c) stvaranje parova.

Poznavanje načina na koje zračenje stupa u interakciju sa materijom je potrebno radi razumevanja procesa nastanka bioloških promena u ozračenom organizmu i zaštite profesionalno izloženih lica od zračenja.

3. DOZIMETRIJA I DETEKCIJA ZRAČENJA

Ozračivanje je izlaganje zračenju. U **radiobiologiji** ozračivanje predstavlja izlaganje živih bića jonizujućem zračenju. **Radioaktivna kontaminacija** je neplanirano i nepoželjno prisustvo radioaktivnih elemenata na površini ili unutar organizma.

U zavisnosti od toga gde se izvor jonizujućeg zračenja nalazi u odnosu na telo, ozračivanje može biti spoljašnje ili unutrašnje (slika 5). **Spoljašnje ozračivanje** nastaje kada se izvor zračenja (radioaktivni elementi, rendgenska cev) nalazi van organizma, a **unutrašnje ozračivanje** kada se izvor jonizujućeg zračenja (radioaktivni elementi) nalazi u organizmu (slika 5).



Slika 5. Izvori zračenja u životnoj sredini, spoljašnje i unutrašnje ozračivanje.

Da bi se pratilo izlaganje stanovništva, profesionalno izloženih lica i živih bića zračenju potrebno je poznavati dozu⁵ zračenja, odnosno količinu energije koju zračenje preda materiji kroz koju prolazi. Naučna oblast koja meri i proračunava doze jonizujućeg zračenja naziva se **dozimetrija**. Dozimetrija je skup instrumentalnih i računskih metoda kojima se određuje energija (doza) koju jonizujuće zračenja preda sredini kroz koju prolazi. **Radijaciona doza**, ili samo doza, je fizička veličina koja služi kao kvantitativna mera nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima, odnosno količina energije jonizujućeg zračenja apsorbovana u materiji.

⁵ Pojam doza je preuzet iz medicine i potiče od grčke reči *δόση* što znači davanje.

3.1. Dozimetrijske veličine i jedinice

Za procenu radijacione doze koriste se različite dozimetrijske veličine i jedinice: ekspozična doza, apsorbovana doza, ekvivalentna i efektivna doza⁶.

Ekspoziciona doza ili samo ekpozicija (X) je količina jona istog naelektrisanja koja nastaje u vazduhu određene mase pri prolasku X i gama zračenja. Prestavlja se relacijom:

$$X = \Delta Q / \Delta m$$

gde je ΔQ apsolutna vrednost ukupnog naelektrisanja svih jona istog znaka u vazduhu, a Δm masa vazduha.

Jedinica za ekspozičnu dozu u SI je kulon po kilogramu (C/kg) i predstavlja merilo jonizacije koju X i gama zračenje proizvede u materiji. Vansistemska jedinica je rendgen (R):

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Efekat jonizujućeg zračenja na živi organizam ne zavisi samo od doze zračenja već i od vremena boravka u polju zračenja⁷. Zbog toga je uveden pojam *brzina doze zračenja* (ili jačina doze) koji predstavlja dozu u jedinici vremena (sat, dan, godina).

Jačina (brzina) ekspozične doze (\dot{X}) je ekspozična doza u jedinici vremena (s):

$$\dot{X} = \Delta X / \Delta t$$

Jedinica je kulon po kilogramu u sekundi (C/(kg·s)).

Apsorbovana doza zračenja se definiše kao količina energije (ΔE) koju bilo koje jonizujuće zračenje prenese na jediničnu masu (Δm) homogenog materijala kroz koji prolazi:

$$D = \Delta E / \Delta m$$

Jedinica u SI je grej (Gy). Doza od 1 Gy predstavlja apsorbovanu energiju zračenja od jednog džula koju zračenje preda jednom kilogramu mase bilo koje homogene materije (1 Gy = 1 J/kg). Vansistemska jedinica za apsorbovanu dozu je rad („Radiation Absorbed Dose“).

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}; 1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$$

Brzina apsorbovane doze (\dot{D}), ili jačina doze, predstavlja apsorbovanu dozu (ΔD) u jedinici vremena (t). Definiše se kao količina energije (ΔE) koju bilo koja vrsta jonizujućeg zračenja prenese na jediničnu masu (Δm) homogenog materijala kroz koji prolazi, u jedinici vremena. Jedinica je grej u sekundi (Gy/s):

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{t}$$

Štetni efekti koje zračenje izaziva kod živih bića ne zavise samo od doze i brzine doze zračenja, već i od vrste zračenja. Zračenja se međusobno razlikuju po svojim sposobnostima da izazovu promene u tkivima i organima. Na primer, doza od 1 Gy alfa zračenja izaziva veći stepen oštećenja u organizmu u odnosu na dozu od 1 Gy beta zračenja. Razlog je taj što

⁶ Dozimetrijska veličina je i kerma (K) koja predstavlja energiju fotona predata elektronima u nekom materijalu (voda, vazduh i slično).

⁷ Polje zračenja je domet dejstva zračenja, odnosno prostor u kome se može detektovati zračenje.

je alfa čestica sporija i veća, i dovodi do nastanka većeg broja jonskih parova po jedinici pređenog puta. Da bi mogli da se uporede biološki efekti različitih vrsta zračenja, uvedena je fizička veličina *ekvivalentna doza* (H), koja predstavlja proizvod srednje apsorbovane doze u tkivu ili organu (D) i odgovarajućeg radijaciono težinskog faktora W_R . Jedinica je sivert (Sv), a vansistemska jedinica je rem (1 Sv = 100 rema).

Ekvivalentna doza koju materija dobija ozračivanjem od strane zračenja R (H_R) iznosi:

$$H_R = W_R \cdot D$$

gde je D prosečna vrednost apsorbovane doze, a W_R je radijaciono težinski faktor za vrstu zračenja R . Ovaj faktor predstavlja bezdimenzionalni broj kojim se izražava razlika u biološkim efektima izazvanim različitim vrstama zračenja (tabela 1)⁸.

Tabela 1. Radijaciono težinski faktori (W_R) za različite vrste zračenja.

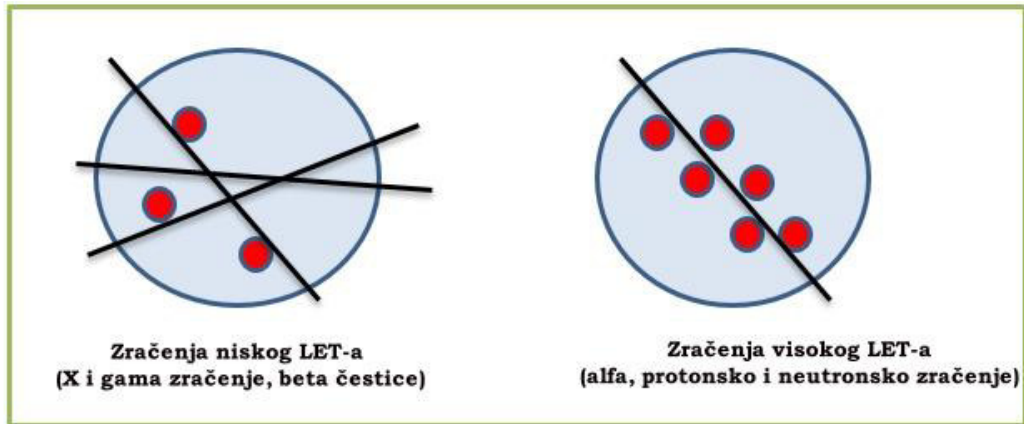
Vrsta zračenja i energetski opseg	Radijaciono težinski faktor, W_R
Fotoni, svih energija	1
Elektroni svih energija	1
Neutroni energija manjih od 10 keV	5
Neutroni energija od 10 keV do 100 keV	10
Neutroni 100 keV do 2 MeV	20
Neutroni 2 MeV do 20 MeV	10
Neutroni energija većih od 20 MeV	5
Protoni energije veće od 2 MeV	5
Alfa čestice, fisioni fragmenti, teška jezgra	20

Vrednosti radijaciono težinskih faktora (W_R) su određene na osnovu faktora relativne biološke efikasnosti (RBE) zračenja i linearnog prenosa energije (eng. *LET, Linear Energy Transfer*). RBE zračenja predstavlja indeks kojim se upoređuje stepen oštećenja u organizmu izazvan dejstvom različitih vrsta zračenja. Računa se kao odnos doze X zračenja energije 250 keV i doze ispitivanog zračenja koja je potrebna da izazove isti biološki efekat:

$$RBE = \frac{\text{doza u Gy } X \text{ zračenja energije 250 keV}}{\text{doza u Gy ispitivanog zračenja potrebna da izazove isti štetni efekat}}$$

Linearni prenos energije predstavlja deo apsorbovane energije zračenja po jedinici pređenog puta kroz neku sredinu, odnosno jonizujući efekat zračenja duž njihovih putanja. Jedinica je keV/ μ m. Na osnovu linearnog prenosa energije zračenja se dele na zračenja niskog LET-a (X i gama zračenje, i beta čestice) i zračenja visokog LET-a (alfa, protonsko i neutronske zračenja) (slika 6).

⁸Na primer, apsorbovana doza D od 1 Gy za X , γ i β zračenja jednaka je ekvivalentnoj dozi H od 1 Sv, dok je apsorbovana doza D od 1 Gy protonskog zračenja jednaka ekvivalentnoj dozi H od 5 Sv.



Slika 6. Podela zračenja na osnovu lineranog prenosa energije.

Alfa čestice su pozitivno naelektrisane i imaju relativno veliku masu, pa se kroz materiju kreću sporo, proizvodeći gustu jonizaciju po dužini pređenog puta. Beta čestice, bilo pozitivnog ili negativnog naelektrisanja, imaju manju masu nego alfa čestice, prolaskom kroz materiju stupaju u manji broj interakcija sa atomima i molekulima što dovodi i do manje jonizacije materije. Fotoni elektromagnetnog jonizujućeg zračenja dovode do indirektna jonizacije materije i nastanka visokonergijskih elektrona, koji vrše dalju jonizaciju materije isto kao i beta čestice.

Tkiva i organi nisu podjednako osetljivi na zračenje. Da bi se procenio štetni efekat zračenja na različita tkiva i organe uvedena je fizička veličina *efektivna doza (E) zračenja*. Efektivna doza se ne može izmeriti, ona se proračunava, i predstavlja sumu svih ekvivalentnih doza tkiva ili organa H_T i odgovarajućih težinskih faktora tkiva W_T . Jedinica je sivert (Sv), i prikazuje se relacijom:

$$E = \sum W_T H_R = \sum W_T \sum W_R D$$

gde je

W_T - težinski faktor tkiva ili organa T;

H_R - ekvivalentna doza za tkivo ili organ T;

W_R - radijacioni težinski faktor;

D - srednja apsorbovana doza.

Ove relacije se odnose na tkiva ili organe ozračene spoljašnjim ili unutrašnjim izvorima zračenja. Predložene vrednosti tkivno težinskih faktora W_T date su u tabeli 2.

Tabela 2. Vrednosti tkivno težinskih faktora (W_T) za ljude
(Sl. Gl. RS, 86/2011).

Tkivo ili organ, T	W_T	ΣW_T
kostna srž (crvena), debelo crevo, pluća, želudac, dojke, preostali organi	0,12	0,72
gonade	0,08	0,08
bešika, jetra, jednjak, štitna žlezda	0,04	0,16
koža, kosti, mozak, pljuvačne žlezde	0,01	0,04
UKUPNO		1

Preostali organi su: nadbubrežne žlezde, mozak, ekstratorakalna regija, žučna kesa, srce, bubrezi, limfni čvorovi, mišićno tkivo, usna duplja, pankreas, prostata (♂), tanka creva, slezina, timus, materica/grlič (♀).

3.2. Dozimetrija u radioekologiji

Naučna oblast koja se bavi zaštitom živog sveta od ozračivanja naziva se radioekologija. Poslednjih decenija razvijeno je nekoliko programa, kao što su *ERICA*, *RESRAD-BIOTA*, *FASSET*, *EA R&D 128*, pomoću kojih se mogu proceniti i predvideti štetni efekti zračenja na živa bića. Prema preporukama Naučnog komiteta Ujedinjenih Nacija za efekte atomskog zračenja (UNSCEAR) iz 2008. godine, za određivanje ekvivalentne doze zračenja za životinje i biljke koriste se sledeće vrednosti radijaciono težinskih faktora (W_R):

- za alfa zračenje 10,
- za gama i beta zračenje 1,
- za beta zračenje energija nižih od 10 keV nisu date preporuke.

U programima *ERICA* i *FASSET* za beta zračenje energija nižih od 10 keV koristi se vrednost 3. Tkivno težinski faktori (W_T) koji se koriste za određivanje efektivne doze zračenja za sada nisu definisani.

3.3. Detekcija jonizujućih zračenja

Pod pojmom detektori zračenja podrazumevaju se svi uređaji koji vrše detekciju jonizujućeg ili neutronskeg zračenja, kao i merenje bilo koje bitne osobine zračenja⁹. Detektori se međusobno razlikuju po agregatnom stanju efikasne zapremine detektora, informaciji koja se dobija kao rezultat interakcije jonizujućeg zračenja sa efikasnom zapreminom detektora i prema vrsti zračenja koja se detektuje.

Detekcija zračenja se može vremenski i prostorno podeliti u tri faze:

- a) Prva faza je dospevanje jonizujućeg zračenja u detektor. Detektori mogu biti selektivno osetljivi i koristiti se za detekciju samo jedne vrste zračenja, na primer gama detektori, alfa detektori, beta detektori. Postoje i detektori koji istovremeno mogu da detektuju više vrsta zračenja, kao na primer alfa-beta brojači.
- b) Druga faza je odgovor detektora na zračenje i posledica je interakcije jonizujućeg zračenja sa efikasnom zapreminom detektora. Za detekciju i dozimetriju jonizujućih zračenja koriste se sledeći fizički i hemijski fenomeni: jonizacija gasa (jonizacioni detektori), ekscitacija i luminiscencija čvrstih tela (scintilacioni detektori, fotoluminiscentni dozimetri, termoluminiscentni dozimetri), hemijske promene na fotoemulzijama (film dozimetri), itd. Detektori se prema vrsti agregatnog stanja efikasne zapremine dele na *gasne*, *tečne* i *čvrste*.
- c) Treća faza je indikacija, odnosno dobijanje informacija od strane detektora. Informacije mogu biti različite: pojava naelektrisanja koja se može manifestovati u vidu impulsa ili promene napona, blesak svetlosti (scintilacija), luminiscencija i drugo.

U oblasti biodozimetrije, za procenu izlaganja profesionalno izloženih lica jonizujućem zračenju, apsorbovana doza zračenja se procenjuje na osnovu učestalosti nestabilnih hromozomskih aberacija u limfocitima periferne krvi.

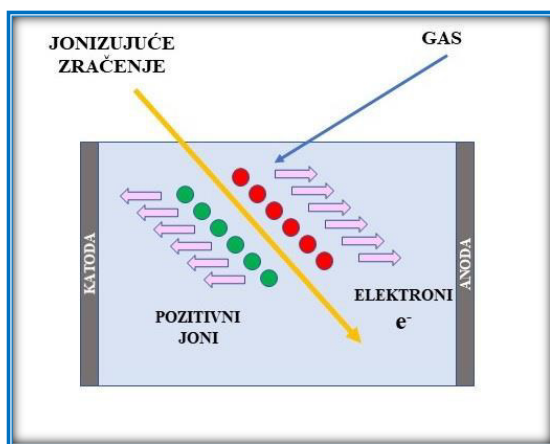
Prema vrsti podataka koji se dobijaju detektori se dele na *brojače*, koji registruju samo prolazak zračenja brojanjem interakcija nastalih u detektoru, i *spektrometre* koji mogu da izmere i energiju zračenja. Postoji i treća vrsta detektora koji mere apsorbovanu dozu jonizujućeg zračenja i oni se nazivaju *dozimetri*.

3.3.1. Jonizacioni detektori

Jonizacioni detektori se dele na gasne i poluprovodničke detektore. **Gasni detektori** su uređaji kod kojih je detekciona sredina ispunjena gasom. Prolaskom kroz gas zračenje stupa u interakciju sa atomima i molekulima, usled čega dolazi do jonizacije gasa i stvaranja jonskih parova (slika 7). Dovođenjem napona na elektrode detektora, katodu i anodu,

⁹ Detekcija jonizujućeg zračenja je uvek indirektan proces koji se zasniva na različitim mehanizmima interakcije (najčešće ekscitacija i jonizacija) zračenja sa materijom kroz koju prolazi. Način interakcije zavisi od fizičkih osobina zračenja (vrste i energije zračenja) i strukturnih osobina detektorskih materijala.

razdvajaju se pozitivno naelektrisani joni i negativno naelektrisani elektroni, pri čemu nastaje strujni impuls koji se registruje. Broj stvorenih jonskih parova zavisi od energije koju je jonizujuće zračenje deponovalo tokom interakcije sa atomima i molekulima gasa.



Slika 7. Šematski prikaz rada gasnih detektora.

Poluprovodnički detektori su uređaji kod kojih je efikasna zapremina čvrst poluprovodnički materijal u kome zračenje izaziva jonizaciju¹⁰. Koriste se za spektrometriju gama zračenja u kojoj se analizom dobijenih impulsa može kvantitativno i kvalitativno odrediti prisustvo radioaktivnih elemenata.

3.3.2. Scintilacioni i termoluminiscentni detektori

Scintilacija je sposobnost određenih hemijskih jedinjenja, u čvrstom ili tečnom stanju, da apsorbuju energiju upadnog jonizujućeg zračenja i da je transformišu u svetlost. Merenjem intenziteta nastale svetlosti dobija se informacija o intenzitetu i energiji upadnog zračenja. **Scintilacioni detektori** mogu biti tečni i čvrsti, organski i neorganski. Od organskih scintilatora najveću primenu imaju tečni detektori za detekciju beta emitera niske energije (¹⁴C, ³H). Od neorganskih scintilacionih detektora najpoznatiji je natrijum-jodidni dopovan talijumom (NaI(Tl)), kristalni detektor pogodan za detekciju gama zračenja.

Osnovni delovi scintilacionih detektora su scintilator, fotomultiplikator i elektronski delovi. Princip rada ovih detektora je sledeći:

- čestica ili foton jonizujućeg zračenja dovode do ekscitacije elektrona u kristalu,
- deekscitacija elektrona je praćena emitovanjem svetlosti koja dopire do fotomultiplikatora ili fotodiode koja služi za pretvaranje svetlosti u električni impuls,

¹⁰ Prolaskom gama fotona kroz poluprovodnički detektor zračenje stupa u interakciju sa atomima poluprovodničkog materijala, dolazi do jonizacije i nastanka sekundarnih elektrona. Nastali sekundarni elektroni se kreću ka pozitivno polarizovanom sloju poluprovodnika gde predaju svoje naelektrisanje i nastaje strujni impuls čija je amplituda proporcionalna nakupljenom naelektrisanju, odnosno energiji fotona predatoj efikasnoj zapremini detektora. Strujni impulsi se naknadno pojačavaju i obrađuju.

- nastali električni impulsi se obrađuju u elektronskom delu detektora,
- veličina nastalog impulsa je proporcionalna energiji čestice ili fotona deponovanoj u kristalu detektora,
- upotrebom analizatora može se odrediti i energija upadnog zračenja.

Termoluminiscentni detektori (ili TLD dozimetri) služe za određivanje doze zračenja koju prime profesionalno izložena lica na svom radnom mestu. Za njihovu izradu najčešće se koriste litijum-fluorid (LiF), kalcijum-fluorid (CaF₂) i kalcijum-sulfat (CaSO₂). Princip rada je sledeći:

- jonizujuće zračenje pobuđuje elektrone molekula detektorske supstance na više energijske nivoe, na kojima elektroni ostaju pri normalnoj spoljnoj temperaturi,
- zagrevanjem detektora na temperature od oko 200 °C dolazi do deekscitacije elektrona uz emisiju svetlosti,
- emitovana svetlost se meri i detektuje pomoću posebnog čitača. Intezitet emitovane svetlosti zavisi od apsorbovane doze zračenja, pa se njenim merenjem ona indirektno određuje.

4. JONIZUJUĆA ZRAČENJA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Jonizujuća zračenja i radioaktivni elementi koji su prisutni u životnoj sredini mogu biti **prirodnog** ili **proizvedenog** (antropogenog) **porekla**. Prirodni izvori zračenja datiraju od perioda formiranja planete, dok su antropogeni izvori zračenja proizvodi ljudske delatnosti.

U životnoj sredini su prisutni različiti prirodni i proizvedeni izvori zračenja koji dovode do ozračivanja živih bića. Najznačajniji su:

- prirodni radionuklidi prisutni u stenama, zemljištu, vodi i hrani,
- kosmičko zračenje i kosmogeni radionuklidi,
- prirodno obogaćeni radioaktivni materijal (eng. *NORM - Naturally Occurring Radioactive Material*) koji nastaje kao posledica ljudskih aktivnosti,
- jonizujuće zračenje i radioaktivni elementi prisutni u biosferi kao posledica nuklearnih testiranja i akcidenata na nuklearnim postrojenjima, radioaktivni otpad i slično, i
- izvori zračenja koji se koriste u medicini, veterini, poljoprivredi, i industriji.

Osnovni nivo zračenja u životnoj sredini kome su izložena sva živa bića naziva se **fon** (eng. *background*). Fon predstavlja ukupno jonizujuće zračenje koje potiče iz prirodnih izvora ili izvora zračenja prisutnih u životnoj sredini koji ne podležu kontroli. Ljudi svojim delovanjem ne mogu da smanje dozu zračenja koju stanovništvo i živa bića primaju iz prirodnih izvora zračenja (tabela 3). Za razliku od toga, jonizujuća zračenja koja nastaju ljudskim aktivnostima, na primer upotreba rendgen aparata i CT skenera, mogu se kontrolisati racionalnom upotrebom ovih izvora u medicini i veterini. Prema izveštaju Naučnog Komiteta Ujedinjenih Nacija za efekte atomskog zračenja (UNSCEAR, 2008), prosečna godišnja ekvivalentna doza zračenja koju stanovništvo u svetu prima iz prirodnih i proizvedenih izvora zračenja je oko 3 mSv.

4.1. Prirodni izvori jonizujućeg zračenja

Kosmičko zračenje, kosmogeni radionuklidi i zračenje poreklom od prirodnih radioaktivnih elemenata prisutnih u zemljištu (zemljišni radionuklidi) čine prirodne izvore zračenja u životnoj sredini. Prirodni izvori zračenja dovode do neprekidnog ozračivanja svih živih bića na planeti. Prosečna godišnja ekvivalentna doza za stanovništvo širom planete koja potiče iz prirodnih izvora zračenja je 2,42 mSv/godišnje (tabela 3), od čega radioaktivni gas radon u najvećoj meri doprinosi ozračivanju ljudi (50%).

Tabela 3. Prosečna godišnja ekvivalentna doza zračenja za čoveka (UNSCEAR, 2008).

Izvor zračenja	Ekvivalentna doza (mSv)	
	Srednja vrednost	min-max vrednost
Prirodna radioaktivnost		
<i>Spoljašnji izvori zračenja</i>		
Kosmičko zračenje	0,39	0,3 - 1,0
Zemljišno zračenje	0,48	0,3 - 0,6
<i>Unutrašnji izvori zračenja</i>		
Inhalacija (uglavnom radon)	1,26	0,2 - 10
Ingestija	0,29	0,2 - 0,8
Ukupno	2,42	
Proizvedena radioaktivnost		
Medicinski izvori zračenja	0,6	
Atmosferske nuklearne probe	0,005	
Profesionalno izlaganje	0,005	
Akcident u Černobilju	0,002	
Ciklus nuklearnog goriva	0,0002	
Ukupno	0,6	

Nivo prirodne radioaktivnosti na planeti nije svuda jednak. Na Zemlji postoje geografske oblasti gde su izmerene doze zračenja i do 800 puta veće od prosečnih, kao što su oblasti: Araxá u Brazilu, Kerala i Madras u Indiji, i Ramsar u Iranu.

Faktori koji utiču na intezitet prirodnog zračenja su: vrsta kosmičkog zračenja, nadmorska visina, geografska širina i dužina, sadržaj prirodnih radioaktivnih elemenata u biosferi i geološke karakteristika zemljišta.

4.1.1. Kosmičko zračenje

Kosmičko zračenje vodi poreklo sa Sunca i iz međuzvezdanog prostora. Sastoji se od širokog spektra prodornog jonizujućeg zračenja: protona, alfa čestica, elektrona i fotona. Dospevanjem u gornje slojeve atmosfere primarno kosmičko zračenje stupa u interakciju sa materijom atmosfere, pri čemu nastaje sekundarno kosmičko zračenje koje dospeva do zemlje. Atmosfera deluje kao štit i značajno smanjuje količinu primarnog kosmičkog zračenja koja dospeva na zemlju. U gornjim slojevima atmosfere, interakcijom kosmičkog zračenja sa materijom, nastaju kosmogeni radionuklidi, kao na primer ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na , $^{32,33}\text{P}$ (tabela 4).

Tabela 4. Fizičke karakteristike pojedinih kosmogenih radionuklida.

Radionuklid	Period poluraspada ($T_{1/2}$)	Radionuklid	Period poluraspada ($T_{1/2}$)
^3H	12,3 godina	^{32}P	14,3 dana
^7Be	53,3 dana ¹¹	^{33}P	25,3 dana
^{14}C	5730 godina	^{22}Na	2,6 godina

Kosmičko zračenje ima veliku energiju i prodornu moć, a intezitet mu postepeno opada prema nižim slojevima atmosfere. Prodorna moć primarnog kosmičkog zračenja je različita. Jedan deo ovog zračenja ne dospeva do površine Zemlje jer se potpuno apsorbuje u atmosferi. Druga komponenta kosmičkog zračenja može da prodre kroz atmosferu do površine Zemlje i da se tu apsorbuje. Izuzetno veliku prodornu moć ima onaj deo kosmičkog zračenja koji slabo interaguje sa česticama atmosfere ili zemlje. Ovi zraci mogu da prodru i nekoliko stotina metara u dubinu Zemljine kore pre nego što se u potpunosti apsorbuju.

Intezitet kosmičkog zračenja zavisi od niza faktora, kao što su geografska širina i dužina, nadmorska visina, godišnje doba, meteorološki uslovi. Razlike vezane za geografsku širinu su posledica delovanja magnetnog polja Zemlje, tako da su najniže vrednosti kosmičkog zračenja u blizini ekvatora, dok su na polovima više. Sa porastom nadmorske visine raste i intezitet kosmičkog zračenja, što je posledica njegove manje apsorpcije u atmosferi.

Kosmogeni radionuklid ^{14}C je beta emiter sa periodom poluraspada od 5730 godina. Veoma brzo po nastanku u atmosferi oksiduje do CO_2 koji biljke koriste u procesu fotosinteze. Na taj način se preko biljojeda CO_2 uključuje u lanac hrane. Kada biljka ili životinja ugine, aktivnost ^{14}C opada po zakonu radioaktivnog raspada, pa se na osnovu njegovog sadržaja može datirati starost arheoloških iskopina.

Tricijum ^3H je jedini radioaktivni izotop vodonika. Kosmogeni ^3H nastaje u atmosferi odakle putem padavina dospeva na zemlju i u malom procentu se nalazi u geografskim vodama. U životnoj sredini prisutan je i proizvedeni ^3H poreklom od atmosferskog testiranja nuklearnog oružja i iz nuklearnih elektrana. Povećanje sadržaja ^3H u vodama ukazuje na nuklearne probe i akcidente, pa se zato monitoringom radioaktivnosti prati njegova aktivnost u tekućim vodama. Koristi se i kao marker u biološkim i ekološkim istraživanjima, ranije se koristio za proizvodnju luminiscentnih boja za satove i aerodromske piste.

4.1.2. Zemljišno zračenje

Zemljišno zračenje vodi poreklo od prirodnih radioaktivnih elemenata prisutnih na Zemlji od perioda njenog formiranja (praiskonski ili primordijalni radionuklidi), a čiji je

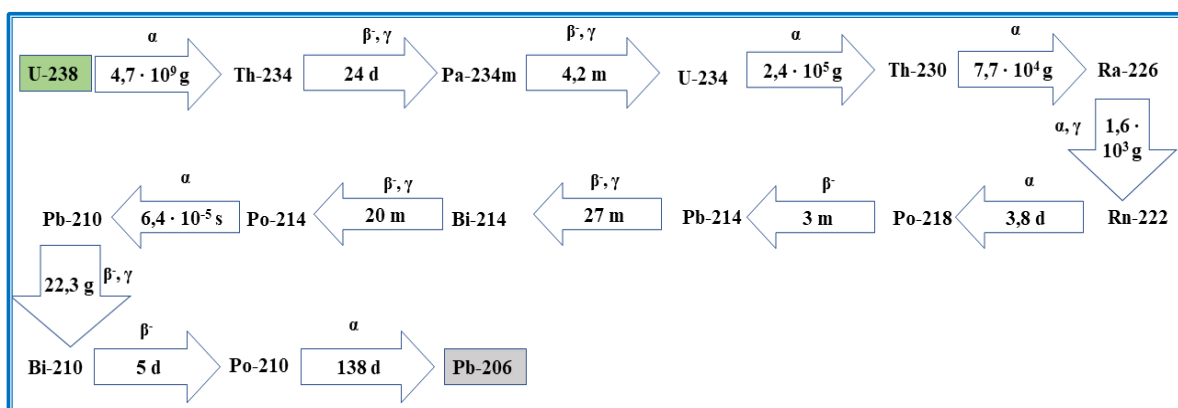
¹¹ Atomi ^7Be nastaju kao rezultat spalacije protona i neutrona visoke energije sa azotom i kiseonikom u atmosferi. Vreme poluraspada ^7Be iznosi 53,3 dana tako da ovaj radionuklid može da putuje kroz atmosferu relativno dugo pre nego se raspadne ili deponuje na zemljinu površinu putem suvih ili mokrih padavina.

atomski broj veći od 83 (bizmut). Svi prirodni radionuklid mogu se svrstati u dve osnovne grupe.

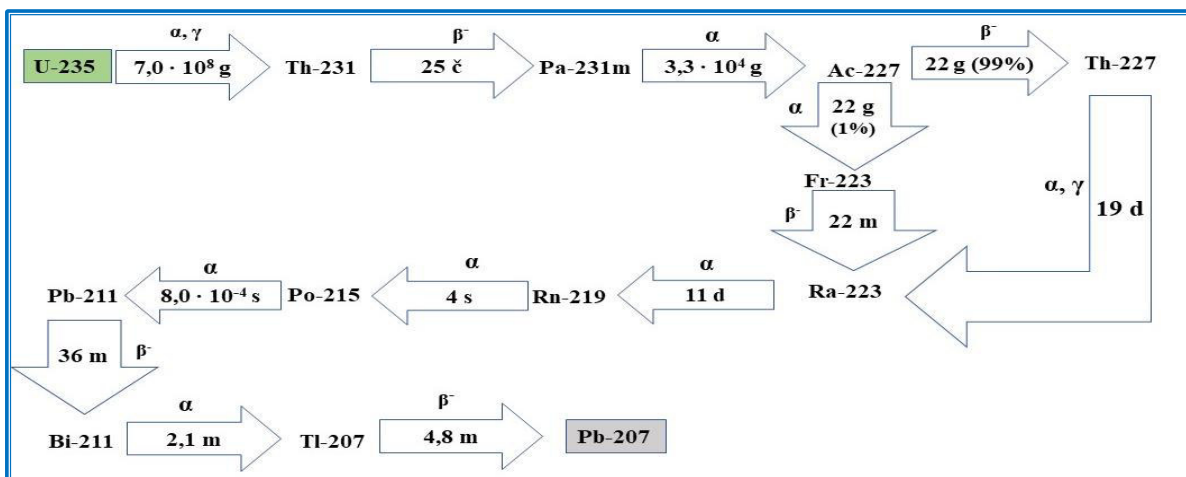
Prvu grupu sačinjavaju radioaktivni elementi uranijum i torijum koji predstavljaju rodonačelnike familija, a koji sa svojim produktima raspada, odnosno potomcima, čine tri radioaktivna niza i to:

1. Uranijumov niz (^{238}U) – prvi u nizu je ^{238}U , niz se završava stabilnim ^{206}Pb (slika 8),
2. Aktinijumov niz (^{235}U) – prvi u nizu je ^{235}U , niz se završava stabilnim ^{207}Pb . Niz nosi naziv po ^{227}Ac , trećem radionuklidu u nizu (slika 9),
3. Torijumov niz (^{232}Th) – prvi u nizu je ^{232}Th , niz se završava stabilnim ^{208}Pb (slika 10).

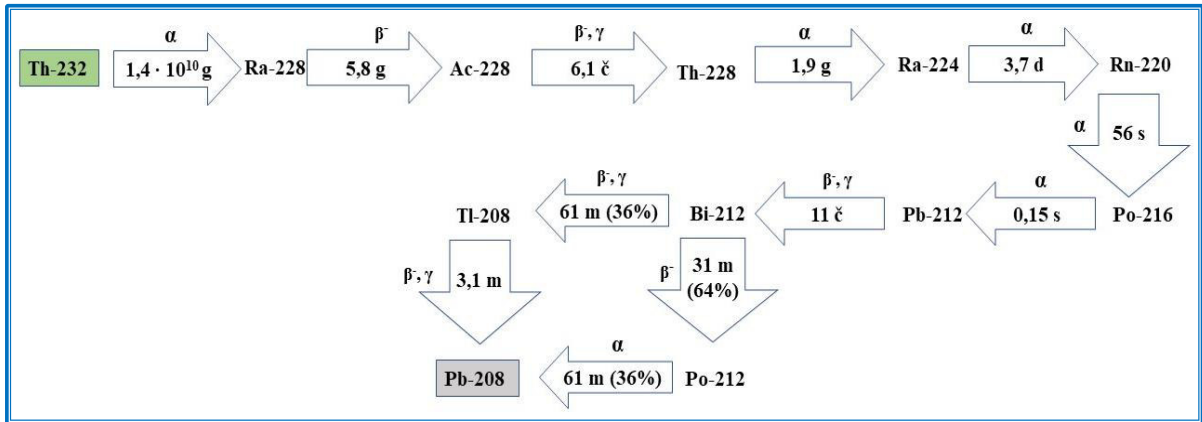
Drugu grupu čine radioaktivni elementi, koji su takođe nastali u periodu formiranja Zemlje. Najznačajniji od njih su ^{40}K i ^{87}Rb , sa vremenom poluraspada od $T_{1/2}=1,28 \cdot 10^9$ godina za ^{40}K i $T_{1/2}=4,9 \cdot 10^{10}$ godina za ^{87}Rb .



Slika 8. Šematski prikaz radioaktivnog raspada uranijumovog (^{238}U) niza. U strelicama je prikazan period poluraspada radioaktivnog elementa (g - godina, č - čas, m - minut i s - sekunda), iznad strelica je naznačena vrsta radioaktivnog raspada.



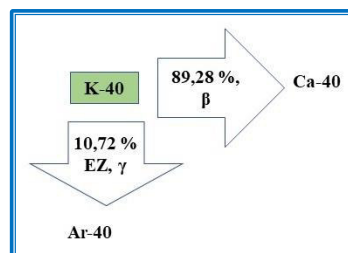
Slika 9. Šematski prikaz radioaktivnog raspada aktinijumovog (^{235}U) niza. U strelicama je prikazan period poluraspada radioaktivnog elementa (g - godina, č - čas, m - minut i s - sekunda), iznad strelica je naznačena vrsta radioaktivnog raspada.



Slika 10. Šematski prikaz radioaktivnog raspada torijumovog (^{232}Th) niza. U strelicama je prikazan period poluraspada radioaktivnog elementa (g - godina, č - čas, m - minut i s - sekunda), iznad strelica je naznačena vrsta radioaktivnog raspada.

Radioaktivnim raspadom rodonačelnika radioaktivnih nizova nastaju trideset i četiri različita radionuklida. Radioaktivni raspadi elemenata praćeni su emitovanjem alfa, beta i gama zračenja. Neki radioaktivni elementi su čisti alfa ili beta emiteri, dok su neki raspadi praćeni i emisijom gama zračenja. Radioaktivni nizovi su potpuno nezavisni jedan od drugog i nigde se ne ukrštaju. Prosečna godišnja ekvivalentna doza zračenja koju stanovništvo na planeti prima usled izlaganja jonizujućem zračenju poreklom od prirodnih zemljišnih radionuklida iznosi oko 0,48 mSv (tabela 3).

Kalijum-40 je prirodni radioaktivni element koji pripada drugoj grupi radioaktivnih elemenata zajedno sa ^{87}Rb . U prirodi se kalijum nalazi kao smeša tri izotopa: ^{39}K (93,2581%), ^{40}K (0,0117%) i ^{41}K (6,7302%), od kojih je ^{40}K radioaktivni izotop sa vremenom poluraspada $1,26 \cdot 10^9$ godina. ^{40}K je beta i gama emiter, čijim radioaktivnim raspadom mogu nastati stabilni izotopi ^{40}Ar ili ^{40}Ca (slika 11). Predstavlja najzastupljeniji prirodni radionuklid u organizmu živih bića, kao i hrani za životinje i namirnicama biljnog i životinjskog porekla.



Slika 11. Šematski prikaz radioaktivnog raspada ^{40}K . U strelicama su prikazane verovatnoća i vrsta radioaktivnog raspada.

Sadržaj ^{40}K u organizmu sisara je pod homeostatskom kontrolom i ne zavisi od njegovog unosa putem hrane i vode. Kod ljudi ^{40}K je u najvećoj meri zastupljen u mišićnom tkivu, dok je u masnom i koštanom tkivu njegov sadržaj niži. Prosečan sadržaj ^{40}K u

organizmu ljudi je oko 60 Bq/kg i zavisi od pola, starosti i uhranjenosti. Prirodni radioaktivni element ^{87}Rb nema većeg značaj u prirodi.

4.1.2.1. Prirodni radionuklidi u lancu ishrane

Uranijum je hemijski element koji se u prirodi javlja kao smeša tri izotopa: ^{238}U (99,27%), ^{235}U (0,72%) i ^{234}U (0,006%). Svi izotopi uranijuma imaju iste hemijske, ali različite fizičke osobine zbog različitog broja neutrona u atomskom jezgru. Stabilnih izotopa uranijuma nema. Uranijum se smatra slabo radioaktivnim elementom, ali hemijski veoma toksičnim teškim metalom.

U životnoj sredini primordijalni radionuklidi su normalno prisutni u stenama i zemljištu odakle se uključuju u lanac hrane. Uranijum i torijum nisu esencijalni elementi za žive organizme, pa se u malom procentu iz zemljišta uključuju u lanac hrane. Sadržaj uranijuma u zemljištu zavisi od tipa matične stene i vrste zemljišta. U vulkanskim stenama sadržaj uranijuma je od 0,1 mg/kg do 5 mg/kg, u sedimentnim od 0,5 mg/kg do 4 mg/kg, i u fosfatnim stenama od 30 mg/kg do 300 mg/kg. Koncentracija uranijuma u zemljištu zavisi od sadržaja gline, koja ima sposobnost da apsorbuje uranijum.

Na migraciju prirodnih radionuklida iz zemljišta u vodu i biljke utiču: fizičko-hemijske osobine zemljišta, pH vrednost, rastvorljivost, i drugi faktori. U hrani životinjskog i biljnog porekla sadržaj prirodnih radionuklida, osim ^{40}K , je obično nizak, svega nekoliko Bq/kg. Kalijum-40 je najzastupljeniji radionuklid u hrani. U hrani za životinje sadržaj ^{40}K se kreće od 98,3 Bq/kg do 516 Bq/kg, u kravljem mleku od 30 Bq/kg do 50 Bq/kg, i junećem mesu od 60 do 80 Bq/kg.

Radijum je prirodni radioaktivni element koji nastaje radioaktivnim raspadom u sva tri radioaktivna niza. Prisutan je u stenama, zemljištu i vodama. Najznačajniji izotop radijuma je ^{226}Ra koji nastaje radioaktivnim raspadom ^{238}U (uranijumov niz), sa vremenom poluraspada od 1622 godine. Ostali izotopi radijuma (^{223}Ra i ^{224}Ra) imaju daleko kraće vreme poluraspada (slike 9 i 10). Radijum je lako rastvorljiv i vrlo pokretan hemijski element. Hemijski je sličan kalcijumu, pa ga biljke lako apsorbuju i preko lanca ishrane može dospeti do čoveka, gde se deponuje u kostima.

Radioaktivnim raspadom radijuma, u sva tri radioaktivna niza, nastaje radioaktivni gas radon. Glavni put kontaminacije ljudi radonom je inhalacija. Prosečna godišnja ekvivalentna doza koju stanovništvo prima usled inhalacije radona je 1,26 mSv (tabela 3), što ukazuje da je gas radon glavni izvor ozračivanja stanovništva. Istraživanja pokazuju da je drugi po redu, posle pušenja, izazivač raka pluća, zbog čega se aktivnost radona meri u školama, obdaništima i drugim građevinskim objektima. Koncentracija radona u zatvorenom prostoru varira tokom vremena na šta utiču doba dana, provetrenost prostorije i godišnje doba.

Torijum-232 je rodonačelnik torijumovog niza, sa periodom poluraspada $1,4 \cdot 10^{10}$ godina. U prirodi se nalazi u zemljištu, obično čvrsto vezan i nerastvorljiv u vodi, zbog čega je u malim količina prisutan u ostalim karikama lanca ishrane. U nekim područjima na planeti, kao na primer u Brazilu (regija Guarapari), Egiptu (delta Nila) i Indiji

(Kerala i Madras), nalazi se u pesku monoazitu koji ima karakterističnu crnu boju. Na ovim lokalitetima brzina apsorbovane doze u vazduhu je nekoliko stotina puta veća u odnosu na druge krajeve sveta.

4.1.3. Povišena prirodna radioaktivnost u životnoj sredini

Svi minerali i sirovine geohemijskog porekla sadrže prirodne radionuklide od kojih su najznačajniji uranijum, torijum i potomci njihovog radioaktivnog raspada, kao i ^{40}K . Ljudske aktivnosti kao što su rudarstvo, naftna i gasna industrija, metalska i fosfatna industrija, građevinarstvo i reciklaža, mogu dovesti do povećanja sadržaja prirodnih radionuklida u životnoj sredini (u čvrstom, tečnom ili gasovitom obliku) i doprineti značajnom povećanju izloženosti stanovništva jonizujućem zračenju. Prirodni radionuklidi koji se ovim putem unesu u životnu sredinu učestvuju u geohemijskim procesima na isti način kao i radionuklidi iz prirodnih izvora.

Preradom prirodnih fosfatnih ruda dobijaju se fosfatni mineralni proizvodi, kao što su fosfatni mineralni aditivi za ishranu životinja i fosfatna mineralna đubriva. Fosfatni mineralni aditivi, monokalcijum i dikalcijum fosfat, mogu sadržati veoma visoke koncentracije uranijuma, čak i do 3000 Bq/kg. Ovi proizvodi se koriste u ishrani životinja kao izvor fosfora i kalcijuma. Iako se životinjama dodaju u malim količinama u obrok (1% do 3%), ovi proizvodi predstavljaju glavni izvor uranijuma u hrani za životinje. Takođe, dugogodišnja upotreba fosfatnih mineralnih đubriva značajno doprinosi povećanju sadržaja uranijuma u životnoj sredini. Uranijum, i potomci njegovog radioaktivnog raspada, uneti na ovaj način u životnu sredinu, mogu predstavljati rizik za stanovništvo i živi svet povišenjem nivoa osnovnog zračenja (fon) i uključivanjem u lanac hrane: zemljište – biljke – životinje – čovek.

5. PROIZVEDENI IZVORI JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

Proizvedeni ili antropogeni izvori jonizujućeg zračenja su produkti ljudskih delatnosti i doprinose povećanju doze zračenja koju živi svet prima tokom godine. Prosečna godišnja ekvivalentna doza koju stanovništvo na planeti prima iz proizvedenih izvora zračenja je oko 0,6 mSv godišnje (tabela 3). Najznačajniji antropogeni izvori jonizujućeg zračenja su:

1. Medicinska upotreba jonizujućeg zračenja i radioaktivnih izotopa,
2. Nuklearne probe i korišćenje nuklearnog oružja,
3. Akcidenti na nuklearnim postrojenjima,
4. Industrijska primena jonizujućeg zračenja i radioizotopa,
5. Odlaganja radioaktivnog otpada u životnu sredinu.

U Republici Srbiji je zakonom zabranjena izgradnja nuklearnih elektrana, postrojenja za proizvodnju nuklearnog goriva i postrojenja za preradu isluženog nuklearnog goriva, tako da ove aktivnosti, kao i iskopavanje i prerada rude uranijuma, ne doprinose dodatnom ozračivanju stanovništva na našoj teritoriji.

5.1. Medicinska upotreba jonizujućeg zračenja

U zavisnosti od toga da li mogu dovesti do kontaminacije radne i životne sredine, izvori jonizujućeg zračenja dele se na zatvorene i otvorene. **Zatvoreni izvor** je radioaktivni materijal hermetički upakovan u kapsulu čija konstrukcija, pod normalnim uslovima korišćenja, sprečava rasprostiranje radioaktivnog materijala u životnu sredinu. **Otvoreni izvor** je radioaktivni materijal u tečnom, gasovitom ili praškastom stanju, koji nije hermetički zatvoren i koji može da izazove kontaminaciju životne sredine.

U medicini i veterini se kao otvoreni izvori zračenja koriste radioaktivni elementi koji u organizmu imaju svog analoga i služe za pripravljanje radiofarmaceutika. **Radiofarmaceutici** su hemijska jedinjenja koja sadrže radionuklide i u takvom obliku se u *in vivo* uslovima koriste u terapijske ili dijagnostičke svrhe. Po unošenju u organizam dospevaju do ciljnog tkiva ili organa. Zračenje koje se emituje tokom njihovog raspada služi za dijagnostiku ili terapiju oboljenja.

U veterinarskoj medicini najčešće korišćeni izvori zračenja su rendgen aparati i uređaji za kompjuterizovanu tomografiju (CT uređaji). Savremene dijagnostičke i terapijske metode lečenja životinja uključuju i nuklearnu medicinu i radioterapiju.

Nuklearna medicina je grana medicine u kojoj se koriste radiofarmaceutici u dijagnostici i terapiji malignih oboljenja. Dijagnostika oboljenja upotrebom radioizotopa

naziva se i *radioizotopska dijagnostika* ili *scintigrafija*, dok se terapija malignih oboljenja upotrebom radioizotopa naziva *izotopska terapija*.

Za **scintigrafiju** malignih oboljenja koriste se gama emiteri koji se u zavisnosti od medicinske indikacije dodaju različitim jedinjenjima. Najčešće se upotrebljava ^{99m}Tc , čist gama emiter sa periodom poluraspada od 6,02 časa. Za endokrinološke preglede koristi se natrijum-pertehnetat ($\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$), u pulmologiji ^{99m}Tc -makroagregati albumina, u onkologiji za preglede kostiju i limfnog sistema ^{99m}Tc -metilendifosfonat (^{99m}Tc -MDP) i drugi preparati. Po unošenju u organizam ^{99m}Tc se distribuira po telu i nakuplja u kritičnom organu u zavisnosti od vrste korišćenog preparata. Scintilacionim detektorom, gama scintilacionom kamerom, detektuju se fotoni dospeli iz kritičnog organa, što omogućava dobijanje planarnih snimaka (u jednoj ravni) distribucije radiofarmaceutika u organizmu. Dobijene slike se obrađuju korišćenjem različitih softvera i dobijaju se scintigrami koji ukazuju na izgled i funkciju ispitivanog organa u zavisnosti od distribucije radiofarmaceutika.

Jednofotonska emisiona tomografija¹² (*SPECT*, eng. *Single-Photon Emission Computed Tomography*) podrazumeva korišćenje gama emitera, ^{99m}Tc , ^{123}I , ^{111}In i drugih, koji prilikom radioaktivnog raspada emituju jedan foton iz jezgra. Snimanje se vrši pomoću rotacione gama kamere koja detektuje zračenje iz organa u kome se deponovao radiofarmaceutik. Na ovaj način dobija se trodimenzionalna slika distribucije radionuklida u telu pacijenta.

Pozitronska emisiona tomografija (PET) se bazira na korišćenju kratkoživećih pozitronskih radionuklida (β^+ emiteri), kao što su ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C , ^{18}F , ^{82}Rb , ^{68}Ga , i PET skenera koji služe za detekciju anihilacionog zračenja energije 511 keV. Anihilacioni fotoni se detektuju pomoću malih scintilacionih detektora cirkularno smeštenih oko ispitivanog dela tela. Kod savremenih hibridnih aparata PET/CT¹³ i PET/MR¹⁴ oba sistema su smeštena u istom uređaju što omogućava istovremeno dobijanje i spajanje slika, a time i pružanje informacija o anatomskim i fiziološkim karakteristikama ispitivanog organa ili dela tela.

Za dijagnostiku maligniteta i metastaza u veterinarskoj medicini se najčešće koristi ^{18}F -FDG (fluor-deoksi-glukoza), supstanca u kojoj je fluor zamenjen radioaktivnim izotopom ^{18}F , što omogućava vizuelizaciju metaboličkih procesa u malignim ćelijama. FDG je analog glukoze i po unosu u organizam prati njene metaboličke puteve. Zbog intenzivnog metabolizma u malignim ćelijama intenzitet preuzimanja FDG je veći u odnosu na zdrave ćelije, što se može videti na scintigrafskom nalazu.

Izotopska terapija podrazumeva aplikaciju radioizotopa, uglavnom beta negativnih emitera, koji ciljnom organu predaju visoku dozu zračenja što za posledicu ima inflamaciju i nekrozu, praćene fibrozom tumorskog tkiva ili tkiva sa hiperfunkcijom. Radiozotopi koji se koriste moraju imati svoje analoge u organizmu. U veterinarskoj medicini najčešće se koristi ^{131}I u terapiji hiperplazije i karcinoma štitne žlezde.

¹² Tomografija je dijagnostička tehnika kojom se dobijaju snimci preseka dela tela, koji se potom pomoću kompjuterskih programa mogu složiti u trodimenzionalnu sliku ispitivanog dela.

¹³ CT – kompjuterizovana tomografija.

¹⁴ MR – magnetna rezonanca.

Radioterapija je složen i skup način lečenja tumora jonizujućim zračenjem: X i gama zračenjem, visokoenergijskim elektronima i protonima.

U zavisnosti od toga kolika je udaljenost od izvora zračenja do površine tela, odnosno tumora, radioterapija se deli na:

- teleradioterapiju, kod koje se izvor jonizujućeg zračenja nalazi na udaljenosti od 5 cm do 100 cm od površine tela, odnosno tumora, i
- brahiterapiju, gde se izvor zračenja nalazi u neposrednoj blizini tumora.

Teleradioterapija, koja se naziva i spoljašnje ili transkutano zračenje, je vid radioterapije kod koje se tumori izlažu zračenju čiji se izvor nalazi izvan organizma. U zavisnosti od energije zračenja koja se primenjuje teleterapija može biti ortovoltazna i supervoltazna.

Ortovoltazna radioterapija koristi zračenja energije od 50 keV do 400 keV koja su generisana u terapijskim rendgen aparatima. Može biti kontaktna, površinska, srednje duboka i duboka. Upotrebom različitih tubusa i filtera podešavaju se dimenzije zračnih polja i dozimetrijske karakteristike zračnog snopa. Primenjuje se u terapiji tumora kože, potkožnog tkiva, metastaza u kostima i slično.

Supervoltazni uređaji generišu zračenja energije preko 1 MeV. Zbog visokih energija zračenja ovi uređaji moraju biti instalirani u posebnim bunkerima. Supervoltazna radioterapija može biti fotonska i korpuskularna. Za potrebe fotonske radioterapije koriste se linearni akceleratori energije 50 MeV (generišu X zračenje) i izotopske mašine, tzv. „kobaltne bombe“ (generišu gama zračenje). Korpuskularna radioterapija se bazira na generisanju čestičnog zračenja, od uređaja se najčešće koriste linearni akceleratori elektrona. Linearni akcelerator elektrona (LINAC) je izocentrični uređaj koji funkcioniše po principu ubrzanja elektrona koji pri sudaru sa metom emituju visokoenergijsko X zračenje, energije od 4 MeV do 25 MeV. Ako se meta izmakne onda elektroni, kao korpuskularno zračenje, dospevaju do pacijenta.

Brahiterapija, koja se naziva i interna radioterapija, način je lečenja malignih oboljenja u kome se izvor zračenja u obliku igle, tube ili kuglice postavlja direktno ili u neposrednu blizini tumorskih promena. Ovim postupkom se obezbeđuje da tumorske promene prime visoke doze zračenja, dok su okolna tkiva minimalno ozračena. Za proizvodnju brahiterapijskih izvora koriste se ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{125}I , ^{60}Co i drugi, uglavnom, beta emiteri. Aplikovanje radioizotopa u ciljni volumen (tumorsko tkivo) može biti privremeno ili trajno. Kod *privremene* ili *frakcionisane* brahiterapije, izvor se privremeno aplikuje u blizinu tumora i nakon ozračivanja se uklanja. Tretman se ponavlja nekoliko puta (u nekoliko frakcija). Kod *trajne brahiterapije*, izvor se trajno pozicionira u tumoru, gde tokom više nedelja i meseci emituje terapijsku dozu.

U odnosu na mesto postavljanja izvora, brahiterapija može biti:

- površinska ili kontaktna, izvor zračenja je na površini tela (tumori kože i vidljivih sluzokoža);
- intrakavitarna (intraluminarna/endoluminarna), izvor se uvodi u prirodne šupljine pomoću aplikatora (vagina, uterus, bešika, nosne i paranazalne šupljine), i
- intersticijalna, izvor zračenja se specijalnim aplikatorima postavlja u tumor.

U veterinarskoj medicini brahiterapija ima ograničenu upotrebu zbog postojanja mogućnosti gubitka i gutanja radioaktivnog izvora od strane pacijenta, ali i zbog tehničkih zahteva za držanje i rukovanje izvorima.

5.2. Nuklearne probe i korišćenje nuklearnog oružja

Prvu nuklearnu probu, Triniti test, izvršile su 1945. godine Sjedinjene Američke Države na području Novog Meksika. Iste godine bačene su i prve atomske bombe na Japan, gradove Hirošimu i Nagasaki, što je dovelo do skoro trenutne smrti više od 200 000 ljudi. Nuklearne sile, SAD, bivši Sovjetski Savez, Francuska i Kina su u periodu od 1945. do 1990. godine izvršile oko 540 atmosferskih i 1900 podzemnih nuklearnih proba. Nuklearne probe mogu biti vazdušne, prizemne, podzemne i podvodne. Vazdušne nuklearne probe dovode do kontaminacije biosfere fisionim radionuklidima, od ^3H do ^{241}Pu .

5.3. Akcidenti na nuklearnim postrojenjima

Nuklearne elektrane su postrojenja koja služe za proizvodnju električne energije. Za razliku od termoelektrana, ne dovode do zagađenja životne sredine emisijom CO_2 , čađi, smoga i ne utiču na globalno zagrevanje. U svetu trenutno postoji više od 400 nuklearnih elektrana raspoređenih u trideset i jednoj državi.

Nuklearni akcident predstavlja neočekivan događaj, ljudsku grešku, otkaz opreme i druge nepravilnosti čije posledice ili moguće posledice nisu zanemarljive sa aspekta zaštite od jonizujućeg zračenja, nuklearne, odnosno radijacione sigurnosti ili bezbednosti.

Akcidenti na nuklearnim postrojenjima mogu dovesti do regionalne, poluglobalne ili globalne kontaminacije životne sredine. U cilju procene obima akcidenta i posledica po zdravlje ljudi i životnu sredinu, Međunarodna agencija za zaštitu od zračenja (IAEA) je donela kriterijume za njihovo razvrstavanje u sedam bezbednosnih kategorija ili nivoa, poznatih kao Internacionalna skala nuklearnih događaja (*eng. International nuclear and radiological event scale, INES skala*). Događaji su klasifikovani u sedam nivoa, od čega se nivoi od 0 do 3 smatraju incidentom, a nivoi od 4 do 7 akcidentom.

Svaki neželjeni nuklearni događaj je neophodno analizirati, predvideti moguće pojave i posledice, definisati planove i procedure za postupanje u datoj situaciji. Ocnom 7 na INES skali ocenjeni su nuklearni akcidenti koji su se dogodili u Černobilju, današnja Ukrajina, 1986. godine, i u Fukušimi, Japan, 2011. godine. Ovi akcidenti doveli su do visoke kontaminacije životne sredine fisionim radionuklidima, od kojih su najznačajniji ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs i ^{90}Sr . Černobiljski akcident je doveo do globalne kontaminacije životne sredine. Na teritoriji Republike Srbije černobiljski ^{137}Cs je još uvek prisutan u životnoj sredini, naročito u

brdsko-planinskim regionima. Akcident u Fukušimi, zbog velike udaljenosti, nije doveo do značajne kontaminacije životne sredine Republike Srbije.

5.4. Industrijska primena jonizujućeg zračenja i radioizotopa

Jonizujuća zračenja i radioizotopi su našli veliku primenu u različitim granama industrije, kao što su prehrambena industrija, sterilizacija farmaceutskih proizvoda, medicinske i druge opreme i prečišćavanje voda. U tu svrhu najčešće se koriste izvori X i gama zračenja, kao i kratkoživeći radioizotopi.

Ozračivanje hrane je fizički proces koji se sastoji u izlaganju hrane elektromagnetnom ili čestičnom zračenju, a u cilju poboljšanja njenog higijenskog kvaliteta. Koriste se elektroni energije manje od 10 MeV ili fotoni energije manje od 5 MeV, da bi se sprečila pojava indukovane radioaktivnosti u ozračenim namirnicama.

Hranljiva vrednost ozračenih namirnica se ovim postupkom ne menja, dok se svarljivost celuloze, polisaharida i pektina poboljšava. Veće doze zračenja mogu dovesti do gubitka vitamina u hrani, pre svega vitamina A, C, E, K, B₁. Namirnice sterilisane na ovaj način se koriste u ishrani ljudi sa smanjenim imunitetom. Cilj ozračivanja hrane je:

- sterilizacija hrane,
- redukcija broja asporogenih i patogenih bakterija do takvog nivoa da se ne mogu detektovati poznatim bakteriološkim metodama,
- uništavanje *Trichinelle spirallis* u mesu,
- uništavanje insekata, larvi i jajašca unutar nekih žitarica,
- sprečavanje klijanja biljnih proizvoda, pre svega luka i krompira.

5.5. Odlaganja radioaktivnog otpada u životnu sredinu

Radioaktivni otpad (RAO) jeste radioaktivni materijal u gasovitom, tečnom ili čvrstom stanju čija dalja upotreba nije planirana ni predviđena. Prema poreklu nastanka može biti:

- nuklearni, otpad iz nuklearnih reaktora, otpad koji nastaje vađenjem i preradom rude uranijuma, nuklearno oružje i dr.,
- nenuklearni, potiče iz bolnica, laboratorija, industrije, javljači dima, gromobrani i drugo.

Radijacioni rizik od RAO zavisi od vrste i koncentracije radionuklida i njihove radiotoksičnosti. Upravljanje RAO obuhvata niz tehničkih mera i aktivnosti kojima se smanjuje mogućnost ozračivanja živih bića i kontaminacija životne sredine, kao što su:

- sakupljanje RAO je postupak pakovanja RAO u trenutku nastanka u odgovarajuće kontejnere,
- privremeno čuvanje RAO u spremištu koje predstavlja namenski objekat ili prostorije koje ispunjavaju uslove radijacione sigurnosti i bezbednosti,

- trajno odlaganje u odlagalištu koje predstavlja nuklearni objekat u koji se RAO smešta trajno bez namere da se iz njega vadi ili vraća u ponovno korišćenje. Odlagališta treba da budu radijaciono bezbedna i da onemoguće prodiranje radioaktivnog zračenja u biosferu u narednih 100 000 do 1 000 000 godina. RAO se skladišti u trajanju od najmanje 10 vremena poluraspada, odnosno do trenutka kada aktivnost radionuklida opadne na hiljaditi deo od početne aktivnosti.

6. RADIOAKTIVNA KONTAMINACIJA ŽIVOTNE SREDINE PROIZVEDENIM RADIOAKTIVNIM ELEMENTIMA

Radioaktivna kontaminacija životne sredine proizvedenim radioaktivnim elementima nastaje: slučajnim ispuštanjem radioaktivnih efluenta iz nuklearnih elektrana, havarijama na nuklearnim postrojenjima, ispuštanjem otpada iz istraživačkih laboratorija i bolnica, neadekvatnim odlaganjem nuklearnog otpada ili testiranjem nuklearnog oružja. Radioaktivni elementi koji na ovaj način prodru u životnu sredinu, bilo u vazduh, vodu ili zemljište, započinju svoju migraciju kroz ekosistem i lanac hrane, i dovode do dodatnog ozračivanja živih bića jonizujućim zračenjem.

Migracija radionuklida kroz različite ekosisteme i karike lanca hrane naziva se *biološki ciklus radionuklida*. Ponašanje radionuklida u životnoj sredini, stepen njihove migracije i uključivanja u lanac hrane zavisi od više faktora: načina dospevanja u životnu sredinu, klimatskih faktora, geografskih karakteristika regija, fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta i fiziološko-morfoloških osobina biljaka i životinja.

6.1. Radioaktivna kontaminacija atmosfere

Atmosfera je gasni omotač koji okružuje Zemlju. Pored gasova u atmosferi se nalaze i čestice koje mogu biti prirodnog ili antropogenog porekla, kao posledica zagađenja životne sredine. Glavni izvori kontaminacije atmosfere proizvedenim radionuklidima su testiranja nuklearnog oružja i akcidenti na nuklearnim postrojenjima.

Postoje dve vrste nuklearnog oružja: fisione ili atomske bombe kod kojih se nuklearna energija oslobađa fisijom jezgara uranijuma ili plutonijuma, i fuzione (zovu se i termonuklearne ili vodonične bombe) kod kojih je atomska bomba okidač koji izaziva fuziju jezgara tricijuma i deuterijuma. Atmosfersko testiranje fisionih bombi dovodi do kontaminacije atmosfere fisionim produktima. Fuzione bombe dovode do kontaminacije atmosfere ^3H , ^{14}C i drugim radioaktivnim elementima, ali i oslobađanjem fisionih produkata, zbog korišćenja fisionog materijala kao okidača za eksploziju.

Akcidenti u nuklearnim elektranama koji su se dogodili 1986. u Černobilju, Ukrajina, i 2011. godine u Fukušimi, Japan, doveli su do oslobađanja fisionih produkata i delova nuklearnog goriva u atmosferu. Fisijom uranijuma i plutonijuma nastaje preko 300 različitih radioaktivnih elemenata (fisioni produkti) (tabela 5). Najveći broj oslobođenih fisionih produkata ima veoma kratak period poluraspada (sekunde, minuti, sati), zbog čega brzo nestaju iz životne sredine i predstavljaju opasnost samo lokalnog karaktera. Od dugoživećih radionuklida poseban značaj za žive organizme imaju ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{89}Sr i ^{90}Sr .

Tabela 5. Najznačajniji fisioni radionuklidi.

Radionuklid	Period poluraspada	Radionuklid	Period poluraspada
⁸⁹ Sr	50,53 d	¹³¹ I	8,02 d
⁹⁰ Sr	28,78 g	¹⁴⁰ Ba	12,75 d
⁹¹ Y	58,51 d	¹⁴¹ Ce	32,50 d
⁹⁵ Zr	64,02 d	¹⁴⁴ Ce	284,9 d
¹⁰³ Ru	39,26 d	¹³⁴ Cs	2,06 g
¹⁰⁶ Ru	373,6 d	¹³⁷ Cs	30,07 g
¹²⁵ Sb	2,76 g		

Atmosferska nuklearna eksplozija ili nuklearni akcident većeg intenziteta dovode do nastanka vatrene kugle i atomskog oblaka u kome se nalaze oslobođeni fisioni produkti u vidu gasova i aerosola¹⁵. Jačina eksplozije utiče na visinu uzdizanja atomskog oblaka u atmosferu, tako da kod jakih eksplozija oblak može dopreti i do stratosfere. Radioaktivni materijal koji dospe u atmosferu taloži se na zemlju u vidu radioaktivnih padavina (*eng. fallout*), i to:

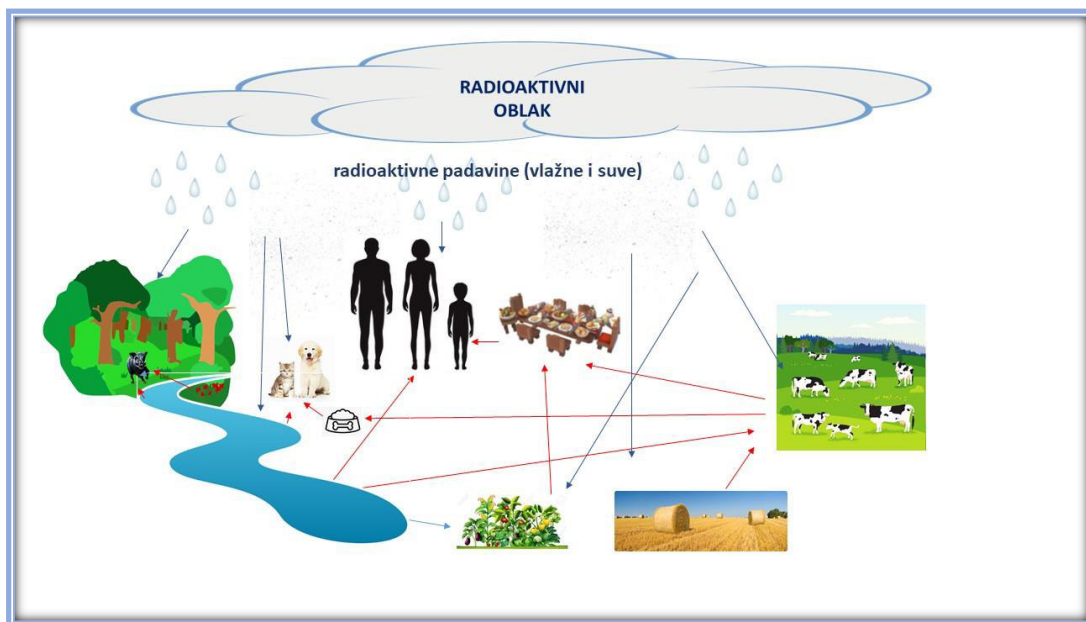
- mokrom depozicijom (kiša, sneg, magla) i
- suvom depozicijom (taloženje čestica pod dejstvom gravitacije).

Radioaktivne padavine mogu biti: neposredne, lokalne, troposferske i stratosferske.

Neposredne radioaktivne padavine nastaju odmah posle eksplozije kada iz nožice atomskog oblaka na tlo padaju krupni komadi različitog materijala (zemljište, konstrukcija objekata) prekrivajući površinu sličnu krugu. **Lokalne radioaktivne padavine** nastaju u periodu od 10 do 20 sati posle eksplozije i sastoje se od velikih čestica, dijametra većeg od 5 μm, koje padaju iz atomskog oblaka na ograničen prostor elipsoidnog oblika, formirajući „ostrvca“ veće kontaminacije. Manje čestice koje su dospele u troposferu naredne 2 do 3 nedelje posle eksplozije postepeno padaju na površinu zemlje. Ove padavine nazivaju se **troposferske radioaktivne padavine** (poluglobalne ili kontinentalne). U zavisnosti od pravca strujanja vetrova šire se oko Zemlje, tako da za vreme od 4 do 7 nedelja naprave pun krug. **Stratosferske ili globalne radioaktivne padavine** čine veoma sitne čestice dospele u stratosferu. Na godišnjem nivou oko 10% ovih čestica se istaloži na zemlju.

Radioaktivni elementi koji se radioaktivnim padavinama istalože na zemlju započinju svoj proces migracije kroz lanac hrane i dovode do ozračivanja i kontaminacije svih živih bića na tom području (slika 12).

¹⁵Aerosoli su čvrste čestice ili male tečne kapi nastale iz dima, prašine, letećeg pepela i kondenzovanih gasovitih supstanci, koje se nalaze u vazduhu.



Slika 12. Šematski prikaz kontaminacije životne sredine u slučaju radioaktivne kontaminacije vazduha. Plave strelice prikazuju puteve kontaminacije, crvene strelice prikazuju puteve migracije radionuklida kroz lanac hrane i njihovo dospevanje do ljudi.

Radioaktivna kontaminacija atmosfere nije uvek primarni put dospevanja radioaktivnih materija u životnu sredinu, ali je put kojim se dospele radioaktivne materije mogu transportovati na veoma velike razdaljine.

6.2. Radioaktivna kontaminacija geografskih voda

Radioaktivno kontaminirane vode su prirodne površinske ili podzemne vode koje pored svog uobičajenog hemijskog sastava sadrže i radioizotope u koncentracijama većim od maksimalno dozvoljenih za vodu za piće.

Radioaktivna kontaminacija geografskih voda fisionim produktima nastaje **taloženjem radioaktivnih padavina**, ispuštanjem **radioaktivnih efluenata** koji nastaju u procesu proizvodnje i korišćenja nuklearne energije, ili ispuštanjem **industrijskih, laboratorijskih ili medicinskih otpadnih voda**. Radioaktivni efluenti i otpadne vode se pri normalnom režimu rada sakupljaju, kontrolišu, obrađuju i dovode u bezopasno stanje da bi se sprečila kontaminacija životne sredine.

Nivo kontaminacije geografskih voda zavisi od: udaljenost od mesta akcidenta, tipa voda, odnosno od toga da li se radi o tekućim ili stajaćim vodama, brzine protoka tekućih voda i konfiguracije zemljišta kroz koju voda protiče. Radionuklidi dospeli u površinske vode se postepeno talože na dno, pa tako sadržaj radionuklida u vodenom sedimentu može biti višestruko veći nego u samoj vodi. Filtracija vode i ishrana su glavni putevi kontaminacije vodenih organizama. Sadržaj radionuklida u ribama i drugim vodenim

organizmima zavisi od vrste organizma i načina ishrane. Ribe se uglavnom kontaminiraju preko hrane, dok relativno malu količinu radionuklida apsorbuju direktno iz vode. Najveći sadržaj radionuklida može se naći kod predatorskih vrsta riba.

6.3. Radioaktivna kontaminacija zemljišta

Zemljište je glavni recipijent radioaktivnih elemenata i najvažnija karika u lancu hrane. Radioaktivna kontaminacija zemljišta može biti **lokalnog karaktera** kada obuhvata relativno malo područje, površine nekoliko desetina kvadratnih kilometara, oko mesta nuklearnog akcidenta ili eksplozije, ili **globalnog karaktera** kada se radionuklidi dospeli u atmosferu šire putem vazduha, a potom putem radioaktivnih padavina talože na zemljište.

6.4. Radioaktivna kontaminacija biljaka

Biljke kao osnovna karika lanca hrane predstavljaju najvažniji put kojim se radionuklidi dospeli u životnu sredinu prenose do životinja i ljudi. Radioaktivna kontaminacija biljaka može nastati direktno i indirektno. **Direktna** kontaminacija je posledica taloženja radioaktivnih padavina, bilo suvom ili vlažnom depozicijom, na nadzemne delove biljaka. **Indirektna** kontaminacija je posledica resorpcije radionuklida iz zemljišta putem korenovog sistema.

Direktna, površinska, kontaminacija biljaka dovodi do folijarne ili floralne resorpcije radionuklida i vremenom se smanjuje zbog uticaja vetrova i kiša koji uklanjaju radionuklide sa površine biljaka. Stepenn resorpcije radionuklida putem lista zavisi od razvojne faze biljke u trenutku depozicije radionuklida, odnosno godišnjeg doba i prisustva i veličine lista. Resorpcija preko cveta je mala, može se reći i da je zanemarljiva. Neposredno posle nuklearnog akcidenta i pojave radioaktivnih padavina direktna kontaminacija je glavni put dospevanja radionuklida u biljke. U kasnijem periodu resorpcija preko korena predstavlja najznačajniji put kontaminacije biljaka.

Resorpcija radionuklida iz zemljišta putem korenovog sistema se može opisati transfer faktorom (T_f) koji se definiše kao sadržaj radionuklida u biljci (Bq/kg) u odnosu na sadržaj istog radionuklida u zemljištu (Bq/kg). Vrednost transfer faktora biljka-zemljište nije vremenski konstantna, na nju utiču fizičko-hemijske promene u zemljištu, dubina korenovog sistema, primena agrotehničkih mera i drugo.

Stepenn radioaktivne kontaminacije biljaka zavisi od nivoa aktivnosti radioaktivnih padavina, vrste i perioda poluraspada radionuklida, morfološko-fizioloških karakteristika biljaka, mineralnog metabolizma biljaka i fizičko-hemijskih osobina zemljišta. Biljke kod kojih je na listovima izražen reljef i koje imaju dlačni pokrivač zadržavaju veću količinu radionuklida u odnosu na biljke sa glatkim i masnim listovima bez dlačnog pokrivača.

Na kraju vegetacionog perioda uginuli delovi biljaka padaju na zemlju gde počinje proces njihovog razlaganja i pretvaranja organske materije u neorgansku. Na ovaj način sa početkom narednog vegetacionog perioda, radionuklidi ponovo započinju svoju migraciju iz zemljišta u biljke.

6.5. Radioaktivna kontaminacija životinja i ljudi

Radioaktivna kontaminacija predstavlja prisustvo radionuklida na površini tela ili u organizmu životinja i ljudi. Može biti spoljašnja (eksterna) i unutrašnja (interna).

Spoljašnja radiokontaminacija životinja i ljudi nastaje taloženjem radioaktivnih padavina (prašina i vodeni talozi) na površini tela. Kod životinja se kontaminiraju pretežno gornji delovi tela, međutim, u uslovima kada pada kiša, sneg ili duva vetar ili ako se životinje kreću preko kontaminiranog zemljišta, može doći do kontaminacije bočnih strana tela i ekstremiteta.

Unutrašnja radiokontaminacija nastaje na tri načina: inhalacijom (15%), ingestijom (80%) i transkutano (5%).

Inhalacija radioaktivnih materija je značajna samo u periodu taloženja radioaktivnih padavina. Inhalacijom se radioaktivni elementi iz vazduha, u vidu gasnih jedinjenja, aerosola i čestica prašine, unose u organizam. Plemeniti gasovi (fisioni produkti ksenon-131 do 136 i kripton-83 do 86) zbog svoje ograničene rastvorljivosti nisu značajan izvor kontaminacije životinja, dok se za razliku od njih gasoviti radioizotopi joda lako resorbuju u plućima. Stepenn resorpcije unetih radionuklida zavisi od njihovih fizičko-hemijskih karakteristika, a pre svega od veličine unetih čestica. Čestice veće od 5 μm se deponuju u gornjim delovima respiratornog trakta, dok manje čestice mogu dospeti do alveola i resorbovati se. Prisustvo inhaliranih radioizotopa može da ošteti epitel respiratornog trakta, naročito u slučaju inhalacije čestica velike aktivnosti (vruće čestice). Kašljanjem i kihanjem radioaktivne čestice se mogu eliminisati iz respiratornog trakta. Kod životinja sadržaj iz usne šupljine gutanjem dospeva u digestivni trakt odakle se radionuklidi mogu resorbovati.

Ingestija je najznačajniji put kontaminacije domaćih životinja i nastaje unošenjem u organizam radioaktivno kontaminirane hrane i vode. Kontaminacija životinja hranom može nastati kao posledica ishrane površinski kontaminiranim biljkama, biljkama kod kojih postoji strukturna kontaminacija usled resorpcije radionuklida putem korena i unosa radioaktivno kontaminirane zemlje. Radioaktivne čestice koje se hranom i vodom unesu u organizam ozračuju digestivni trakt, kao i okolna tkiva i organe. Stepenn resorpcije unetih radionuklida zavisi od: vrste radionuklida, stepena njihove hidro- i liposolubilnosti, potrebe organizma za prisutnim radionuklidima, vrste životinja, kategorije i starosti životinja.

Fiziološke i morfološke specifičnosti različitih vrsta životinja utiču na stepenn njihove kontaminacije. Preživari, naročito ovce i koze, tokom ispaše unose zemlju zajedno sa busenom trave, što dovodi do povećanja stepena njihove radioaktivne kontaminacije. Takođe, bakterije u buragu preživara koriste neorganski kobalt za sintezu vitamina B₁₂.

U slučaju pojave radioaktivnog kobalta u životnoj sredini bakterija u buragu će ga iskoristiti za sintezu vitamina B₁₂ što će doprineti dodatnoj kontaminaciji ovih životinja.

Resorpcija radionuklida iz digestivnog trakta je znatno veća kod mladih životinja, u odnosu na starije jedinke, zbog nezrelosti crevnog epitela. Kod preživara u fazi sisanja ¹³⁷Cs se resorbuje 100% iz digestivnog trakta, dok se po prestanku sisanja resorpcija smanjuje na oko 80%. Uhranjenost životinja i potrebe za esencijalnim mikro i makro elementima takođe utiču na stepen apsorpcije radionuklida iz digestivnog trakta, naročito u slučaju kada se u hrani nađu radioaktivni elementi koji imaju svoje hemijske analoge u organizmu ili ako u hrani postoji deficit njihovog stabilnog izotopa.

Transkutana resorpcija predstavlja unošenje u organizam radionuklida preko intaktne ili povređene kože. Nema veliki značaj kod životinja zbog prisustva dlačnog pokrivača. Tricijum (³H) je jedini radionuklid koji se dobro resorbuje preko kože u obliku tricijumske vode. Stepem kontaminacije zavisi od: nivoa kontaminacije radioaktivnih padavina, vrste radionuklida, njihove rastvorljivosti, kvaliteta i količine dlačnog pokrivača, debljine i vrste potkožnog tkiva. Transkutana resorpcija radionuklida je veća ukoliko postoje oštećenja rožnatog sloja epidermisa, ragade, laceracije ili ukoliko je koža bila izložena hemikalijama, kao što su rastvarači za odmašćivanje.

Radionuklidi koji se u organizam unesu ingestijom, inhalacijom ili transkutano dovode do ozračivanja tkiva i organa, što u slučaju ozračivanja većim dozama zračenja može dovesti do poremećaja njihove funkcije.

7. TOKSIČNOST RADIONUKLIDA

Toksični efekti radionuklida unetih u organizam životinja zavise od: vrste radionuklida, vrste i energije zračenja, perioda poluraspada (fizičkog, biološkog i efektivnog), načina unosa u organizam (inhalacija, ingestija, transkutano), stepena resorpcije, postajanja hemijskih analoga ili stabilnih izotopa u organizmu i tropizma ka pojedinim organima i tkivima. Organ u kome se posle resorpcije u najvećoj meri akumuliraju uneti radionuklidi naziva se kritični ili ciljani organ. Međunarodna atomska agencija je prema toksičnosti radionuklide podelila u četiri grupe (tabela 6).

Tabela 6. Podela radionuklida na osnovu njihove toksičnosti.¹⁶

Grupa toksičnosti	Pojedini radionuklidi
Veoma visoka toksičnost	^{210}Pb , ^{210}Po , $^{223,226,228}\text{Ra}$, $^{227,228}\text{Th}$, $^{233,234}\text{U}$, ^{241}Pu , ^{237}Np , ^{241}Am , ^{90}Sr
Visoka toksičnost	^{22}Na , ^{36}Cl , ^{45}Ca , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{106}Ru , $^{126,131}\text{I}$, ^{144}Ce , $^{134,137}\text{Cs}$, ^{140}Ba , ^{152}Eu , ^{210}Bi , ^{224}Ra , ^{228}Ac , ^{234}Th , ^{236}U
Umerena toksičnost	^7Be , ^{32}P , ^{35}S , ^{36}Cl , ^{59}Fe , ^{60}Co , $^{85,89,92}\text{Sr}$, ^{90}Y , ^{93}Mo , ^{125}Sn , $^{131,140}\text{Ba}$, ^{212}Bi , ^{155}Eu , ^{234}Th
Niska i veoma niska toksičnost	^3H , ^{14}C , ^{37}Ar , ^{85}Kr , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{131\text{m}}\text{Xe}$, $^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{235,238}\text{U}$, ^{232}Th

Stepen resorpcije radionuklida unetih u organizam u značajnoj meri utiče na njihovu toksičnost. Kod monogastičnih životinja, stepen resorpcije radionuklida iz digestivnog trakta je obično veći u poređenju sa preživarima. Prema brzini resorpcije iz digestivnog trakta životinja radionuklidi su poređani u sledećem nizu:

$^{131}\text{I} > ^{137}\text{Cs} > ^{45}\text{Ca} > ^{89,90}\text{Sr} > ^{65}\text{Zr} > ^{60}\text{Co} > ^{59}\text{Fe} > ^{54}\text{Mn} > ^{140}\text{Ba} > ^{106}\text{Ru} > ^{95}\text{Zr} > ^{144}\text{Ce} > ^{90}\text{Y} > ^{239}\text{Pu}$.

Distribucija resorbovanih radionuklida putem krvi i njihova akumulacija u pojedinim tkivima i organima zavise od hemijske prirode radionuklida. Radionuklidi (na primer ^3H , ^{131}I i ^{36}Cl) koji imaju svoje stabilne izotope u organizmu (H, I i Cl) posle resorpcije prate njihove metaboličke puteve.

Ako radionuklidi imaju slična hemijska svojstva kao neki stabilni element, oni se posle resorpcije distribuišu kao njihov hemijski analog. Tako na primer, radiostroncijumu je hemijski analog u organizmu kalcijum, a radiocezijumu je hemijski analog kalijum, pa se posle resorpcije radiostroncijum akumulira u kostima, dok se radiocezijum raspoređuje po celom organizmu. Distribucija resorbovanih radionuklida po organizmu može biti skeletna, retikuloendotelna ili difuzna (tabela 7), što za posledicu ima neravnomerno predavanje energije, tj. pojedina tkiva i organi primaju veću dozu jonizujućeg zračenja.

¹⁶ IAEA, TRS 15 (1963), A basic toxicity classification of radionuclides, Vienna.

Tabela 7. Distribucija pojedinih radionuklida u organizmu sisara.

Radionuklid	Vrsta zračenja	Period poluraspada	Kritični organ
^3H	β^-	12,3 godina	celo telo
^{14}C	β^-	5730 godina	celo telo
^{32}P	β^-	14,3 dana	celo telo
^{89}Sr	β^-	50,5 dana	kosti
^{90}Sr	β^-	28,8 godina	kosti
^{131}I	β^-, γ	8 dana	štitna žlezda
^{134}Cs	β^-, γ	2,3 godine	celo telo
^{137}Cs	β^-, γ	30 godina	celo telo
^{222}Rn	α	3,8 dana	pluća
^{226}Ra	α, γ	1600 godina	kosti
^{232}Th	α	$1,4 \cdot 10^{10}$ godina	kosti, bubrezi, jetra
^{235}U	α	$7,0 \cdot 10^8$ godina	kosti, bubrezi
^{238}U	α	$4,7 \cdot 10^9$ godina	
^{238}Pu	α, γ	87,7 godina	
^{239}Pu	α, γ	24110 godina	
^{240}Pu	α, γ	6563 godina	
^{241}Pu	α, γ	14,35 godina	
^{241}Am	α, γ	432,2 godine	kosti, jetra

Skeletni tip distribucije je karakterističan za radionuklide koji pripadaju grupi zemnoalkalnih metala (Ca, Sr, Ba, Ra). Ovi radioizotopi se dobro resorbuju u crevima, akumuliraju se u kostima i iz organizma se izlučuju uglavnom preko fecesa.

Retikuloendotelni tip distribucije je karakteristika elemenata koji pripadaju grupi lantanoida (La, Ce, Eu i drugi) i transuranskih elemenata koje čini grupa proizvedenih radionuklida sa atomskim brojem od 92 do 103 (Pu, Am, Cf i drugi). Toksičnost ovih radionuklida se ispoljava u vidu poremećaja funkcije jetre, oštećenja tankih creva, a u kasnijem periodu života pojavom ciroze i tumora na jetri i drugim organima.

Distribucija po celom organizmu, tzv. *difuzni tip* distribucije, karakteristika je elemenata prve grupe periodnog sistema (alkalni elementi), Na, K, Rb, Cs, kao i H, N, C i Po. Ovi radioizotopi se u velikoj meri resorbuju iz digestivnog trakta, relativno ravnomerno distribuiraju po organizmu i izlučuju uglavnom putem urina. Toksičnost ovih elemenata ispoljava se u vidu atrofije limfnog tkiva, testisa, poremećaj mišićne funkcije (radiocezijum), dok je u kasnijem periodu života moguća pojava tumora mlečne žlezde, bubrega, creva i drugih organa.

Izotopi uranijuma, plutonijuma i aktinidi se u malom procentu resorbuju iz digestivnog trakta, a iz organizma se eliminišu uglavnom putem fecesa. Ovi radionuklidi imaju afinitet ka kostima, jetri i bubrezima. Zbog svoje veoma velike osetljivosti, čak i na

male doze zračenja, hematopoezni organi i gonade predstavljaju kritične organe za sve resorbovane radionuklide.

7.1. Biološki značajni radionuklidi

Radioaktivni elementi fisionog porekla koji se lako uključuju i migriraju kroz lanac hrane i predstavljaju opasnost za sva živa bića nazivaju se „*biološki značajni radionuklidi*“. Da bi neki radioaktivni element pripadao ovoj grupi treba da budu ispunjeni sledeći uslovi: neophodno je da pri nuklearnoj fisiji nastane u velikoj količini, da ima dovoljno dugo vreme poluraspada, da je u velikoj količini zastupljen u hrani i vodi životinja, da se lako resorbuje u organizmu, da ima svog hemijskog analoga ili stabilnog izotopa u organizmu i da se u kratkom roku i velikoj količini izlučuje iz organizma životinja putem mleka. Za živi svet najznačajniji biološki značajni radionuklidi su ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr i ^{131}I .

7.1.1. Radiocezijum

Radioizotopi ^{134}Cs i ^{137}Cs su fisioni elementi, beta i gama emiteri, čijim radioaktivnim raspadom nastaju stabilni izotopi ^{134}Ba i ^{137}Ba . Kod svih živih bića hemijski analog radiocezijumu je kalijum, pa se posle unosa u organizam i resorpcije difuzno distribuira po telu. U telu životinja radiocezijum je u najvećoj količini prisutan u mišićima i parenhimatoznim organima, dok je njegov sadržaj u krvi, masnom tkivu i koži manji.

Radiocezijum dospeva u životnu sredinu kao posledica nuklearnih eksplozija i havarija. Neposredno posle taloženja radioaktivnih padavina biljke resorbuju radiocezijum preko lista. U kasnijim fazama kontaminacije životne sredine radikularna resorpcija postaje glavni put kontaminacije biljaka. Resorpcija radiocezijuma iz zemljišta u biljke je obrnuto proporcionalna sadržaju kalijuma u zemljištu, odnosno ako je koncentracija kalijuma u zemljištu manja, resorpcija radiocezijuma je veća. Prve dve do tri godine posle dospevanja u životnu sredinu radiocezijum se zadržava u površinskim slojevima zemljišta (do 10 cm), da bi u kasnijem periodu migrirao u dublje slojeve. Sposobnost minerala gline da vežu za sebe radiocezijum i fiksiraju ga utiče na njegovu mobilnost, čineći ga manje dostupnim za resorpciju od strane biljaka. Biljke koje rastu na kiselom zemljištu apsorbuju oko deset puta više radiocezijuma i radiostroncijuma u odnosu na biljke koje rastu na krečnjačkom zemljištu.

Ingestija kontaminirane hrane i vode predstavlja glavni put unosa radiocezijuma u organizam ljudi i životinja. Iz digestivnog trakta životinja radiocezijum se resorbuje u visokom procentu, distribuira se po celom telu, i izlučuje iz organizma životinja putem sekreta (mleko) i ekskreta (feces, urin). Mleko i meso kontaminiranih životinja su glavni izvori kontaminacije ljudi.

Resorpcija radiocezijuma se kod životinja odvija u tankom crevu, najviše u duodenumu, a kod preživara i u buragu. Iz digestivnog trakta monogastričnih životinja ^{137}Cs

se resorbuje od 85% do 100%, kod preživara od 50% do 80% od ukupno unete količine. Biološka eliminacija iz organizma je znatno veća kod preživara u odnosu na nepreživare. Kod preživara se posle jednokratnog unosa u organizam mlekom izlučuje oko 12% od ukupno unete količine ^{137}Cs . U slučaju dugotrajne ingestije kontaminirane hrane i vode ^{137}Cs se prvo nakuplja u organizmu, a zatim se uspostavlja stanje ravnoteže između unosa i izlučivanja iz organizma. Posle uspostavljanja ravnotežnog stanja dnevno se mlekom izluči od 8% do 19% od ukupno unete količine ^{137}Cs (1,3% po litri mleka). Ishrana kabastom, umesto peletiranom hranom, kod malih preživara smanjuje resorpciju ^{137}Cs iz digestivnog trakta i njegov sadržaj u mesu. Radiocezijum se izlučuje i jajima živine i to tako da je njegov sadržaj od 2 do 3 puta veći u belancetu u odnosu na žumance, dok se u ljusci može naći samo od 1% do 2% od ukupno unetog radiocezijuma.

Biološko vreme poluraspada ^{137}Cs je kod ljudi 70 dana. Efektivno vreme poluraspada se kod životinja razlikuje u zavisnosti od vrste, starosti i načina ishrane životinja. Na primer, kod krava u laktaciji je od 20 do 50 dana, ovaca od 14 do 21 dana, pasa 42 dana i 6 dana kod pacova. Mere zaštite domaćih životinja u slučaju radioaktivne kontaminacije životne sredine radiocezijumom biće posebno opisane u poglavlju 13.

7.1.2. Radiostroncijum

Radiostroncijum-89 i 90 su fisioni elementi, beta emiteri, koji pripadaju grupi zemnoalkalnih metala. Beta raspadom ^{90}Sr nastaje radioaktivni element ^{90}Y , beta emiter, sa periodom poluraspada od 64,2 sata, dok raspadom ^{89}Sr nastaje stabilni ^{89}Y . Zbog kratkog poluživota ^{89}Sr predstavlja opasnost za žive organizme u toku jedne do dve godine posle akcidenata (tabela 7).

Biološka opasnost od kontaminacije radiostroncijumom potiče od njegove hemijske srodnosti sa kalcijumom. Pripada grupi osteotropnih radionuklida, pa su kosti i zubi organi u kojima se radiostroncijum akumulira. Glavni put kontaminacije životinja je ingestija kontaminirane hrane, u manjoj meri vode (2%) i inhalacija kontaminiranog vazduha. Stroncijum nije esencijalni element za većinu biljaka, pa je resorpcija radiostroncijuma iz zemljišta u biljke veća ukoliko biljke rastu na zemljištu koje je deficitarno u pogledu Ca, i peskovitim zemljištima sa malim sadržajem gline i organskih materija. Đubrenje kontaminiranog zemljišta krečnjakom može smanjiti resorpciju stroncijuma za faktor 3, s tim da će efekti izostati ukoliko u zemljištu ima dovoljno Ca. Migracija ^{90}Sr u neobrađenom zemljištu je spora, pa se najveći deo ^{90}Sr zadržava nekoliko godina u gornjih 10 cm zemljišta.

Tokom migracije kroz lanac zemljište-biljke-životinje-čovjek, odnos ^{90}Sr prema Ca se menja u korist Ca, pa se sadržaj ^{90}Sr smanjuje u svakoj narednoj karici lanca ishrane.

Resorpcija ^{90}Sr iz digestivnog trakta životinja se kreće u rasponu od 5% do 100% i zavisi od fizičko-hemijskih osobina jedinjenja Sr, sastava hrane, sadržaja Ca u hrani, vrste, kategorije i starosti životinja. Iz digestivnog trakta preživara ^{90}Sr se resorbuje 15%, kod svinja 13%, a kod živine od 50% do 80%. Radiostroncijum se u većem procentu resorbuje kod mladih životinja, u fazi rasta i razvoja, zbog većih potreba za Ca. Dodavanje Ca u hranu za

životinje može smanjiti resorpciju ^{90}Sr kod mladih životinja, dok kod odraslih grla samo u situacijama kada je obrok deficitaran u pogledu sadržaja Ca.

Posle resorpcije iz digestivnog trakta 90% se deponuje u kostima, i to više u dijafizi nego u epifizi, dok u mišićima njegov sadržaj ne prelazi 10% od dnevnog unosa. Prema stepenu nakupljanja radiostroncijuma u kostima životinje se mogu poredati u sledeći niz: goveda < koze < ovce < svinje < pilad.

Iz organizma se izlučuje sekretima i ekskretima. Step en izlučivanja zavisi od toga da li se radi o jednokratnoj (akutnoj) ili višekratnoj (hroničnoj) kontaminaciji životinja. Pri jednokratnoj kontaminaciji fecesom se izlučuje 95%, urinom 1,5% i mlekom 0,9%.

Dugotrajno svakodnevno unošenje radiostroncijuma putem hrane dovodi do porasta nivoa aktivnosti ^{90}Sr u mleku. Posle 7 do 10 dana uspostavlja se ravnoteža između unosa i izlučivanja iz organizma, pa se kravljim mlekom izlučuje od 1% do 3%, a mlekom ovaca i koza oko 4% od dnevno unete količine ^{90}Sr . Kod preživara je izlučivanje ^{90}Sr putem mleka deset puta manje nego izlučivanje ^{137}Cs , što je posledica manje apsorpcije ^{90}Sr u digestivnom traktu. Po prestanku unosa u organizam njegova aktivnost u mleku brzo opada. Mleko koje sadrži ^{90}Sr je veoma važan izvor kontaminacije ljudi, naročito dece. Biološko vreme poluraspada ^{90}Sr je kod ljudi od 200 do 600 dana, svinja i pasa od 90 do 500 dana. Smanjenje sadržaja radiostroncijuma u skeletu mladih životinja uglavnom je posledica rasta i povećanja koštane mase.

Akumulacija ^{90}Sr u kostima dovodi do ozračivanja kostiju, koštane srži i okolnog tkiva. Kod životinja koje su dugotrajno unosile visoke doze radiostroncijuma zabeleženi su: poremećaj imuniteta, leukemija, osteosarkomi, neoplazme endokrinih i mlečne žlezde, kao i poremećaji spermatogeneze i ovogeneze. Radiostroncijum prolazi kroz placentu i kod životinja koje su kontaminirane intrauterino ili neposredno po rođenju češće dolazi do poremećaja rasta, koštane strukture i raka kostiju.

7.1.3. Radiojod

Radioaktivni jod-131 je kratkoživeći fisioni element, beta i gama emiter koji pripada grupi halogenih elemenata. Zbog kratkog perioda poluraspada od 8 dana ^{131}I koji dospe u atmosferu posle akcidenta/ eksplozije skoro potpuno nestane iz životne sredine za oko dva meseca. U poređenju sa ostalim fisionim elementima radiojod je visoko toksičan za ljude i životinje zbog svoje velike isparljivosti, visoke sposobnosti da migrira kroz lanac hrane i akumulacije u štitnoj žlezdi. ^{131}I se iz atmosfere putem radioaktivnih padavina taloži na biljke gde se čvrsto vezuje i teško uklanja pranjem biljaka. Zbog kratkog perioda poluraspada resorpcija putem korena nema veliki značaj u procesu kontaminacije biljaka ^{131}I .

Unos radiojoda hranom je glavni put kontaminacije životinja, dok je inhalacija manje značajna. Iz digestivnog trakta životinja ^{131}I se resorbuje skoro 100%. Resorbovani ^{131}I se krvotokom distribuira po organizmu od čega se od 20% do 60% zadržava u štitnoj žlezdi, gde će intenzitet nastalih promena zavisiti od apsorbovane doze zračenja. Male doze zračenja neće izazvati klinički vidljive poremećaje, dok doze od 20 Gy do 50 Gy dovode do atrofije štitne žlezde praćene degenerativnim promenama na miokardu, anemije,

limfopenije, neutropenije, trombocitopenije i promena u jetri. Doze veće od 70 Gy dovode do potpunog gubitka funkcije štitne žlezde. U cilju proračuna apsorbirane doze u štitnoj žlezdi treba znati da 37 kBq po gramu tkiva preda štitnoj žlezdi dozu od 1 Gy.

Iz organizma životinja ^{131}I se izlučuje urinom (50%), fecesom (20%) i mlekom (8%), a kod ptica jajima. Mlekom muznih krava se tokom prvih par dana posle kontaminacije izlučuje najveća količina ^{131}I , zbog čega je jedna od prvih mera koje se sprovode u cilju zaštite stanovništva posle nuklearnih akcidenata zabrana konzumiranja mleka. Jednokratnim davanjem radiojoda muznim kravama njegov sadržaja u mleku se može detektovati već posle 30 minuta, posle 12 časova mlekom se izlučuje 1,3% po litri mleka u odnosu na ukupno unetu količinu. U slučaju dugotrajne kontaminacije krava radiojodom, sedam do deset dana od početka unosa, dolazi do uspostavljanja ravnoteže u organizmu i mlekom se izlučuje oko 1% od ukupne dnevno unete količine.

Ukoliko u hrani za muzne krave postoji deficit u sadržaju joda, resorpcija radiojoda i njegovo izlučivanje putem mleka će biti veći nego kod životinja koje hranom dobijaju dovoljne količine stabilnog izotopa joda. Kod steonih krava resorpcija radiojoda u mlečnoj žlezdi se povećava pred kraj graviditeta i dostiže maksimum u periodu najveće mlečnosti. Efektivno vreme poluraspada ^{131}I deponovanog u štitnoj žlezdi muznih krava je 7,1 dan, a biološko 63 dana.

Dodavanje stabilnog joda u obliku kalijum-jodida smanjuje akumulaciju radiojoda u štitnoj žlezdu ovaca i teladi za 50%. Kod živine davanje 80 mg kalijum-jodida po jedinki smanjuje resorpciju radiojoda za 80%.

8. RADIOBIOLOGIJA I

Ćelija kao osnovna gradivna jedinica živih bića je primarno mesto dejstva zračenja u organizmu. Prolazeći kroz telo zračenje stupa u interakciju sa atomima i molekulima u ćeliji i predaje im energiju. Posledice te interakcije su jonizacija i ekscitacija atoma i molekula i pokretanje niza lančanih događaja koji dovode do bioloških promena u ozračenoj ćeliji. Promene koje zračenje izaziva u ćeliji mogu se posmatrati u funkciji vremena kroz četiri različite faze:

1. **Fizička faza** je prva faza koja traje oko 10^{-15} sekundi. U ovoj fazi dolazi do interakcije zračenja sa orbitalnim elektronima biomolekula i njihovog okruženja (voda). Atomi i molekuli koji su bliski putanji upadnog zračenja se najčešće jonizuju, dok se udaljeni ekscitiraju. Čestična zračenja, osim neutrona, izazivaju **direktnu jonizaciju** materije tako što svoju energiju prenose direktno na atome i molekule. Elektromagnetna jonizujuća zračenja izazivaju **indirektnu jonizaciju** materije. Ova zračenja prvo stupaju u interakciju sa atomima i molekulima u ćeliji, bilo fotoelektričnim efektom, Komptonovim efektom ili stvaranjem parova, pri čemu se energija zračenja prenosi na elektron koji napušta atom i vrši dalju jonizaciju ili ekscitaciju. Neutroni, kao elektroneutralne čestice, ne dovode do direktne jonizacije u ćeliji, već reaguju samo sa atomskim jezgrima ¹⁷.
2. **Fizičko-hemijska faza** je druga faza koja traje oko 10^{-12} s. U ovoj fazi u ozračenoj ćeliji se pojavljuju oslobođeni elektroni, joni i slobodni radikali.
3. **Hemijska faza** je treća faza koja traje od 10^{-6} do 10^{-3} sekundi. Tokom ove faze nastali slobodni radikali reaguju sa okolnim biomolekulima izazivajući primarna oštećenja. Ako oštećenja u ćeliji nastanu kao posledica radiolize, najčešće vode, i interakcije nastalih slobodnih radikala sa biomolekulima govorimo o **indirektnom dejstvu zračenja** na živi organizam. U slučaju da zračenje direktno stupi u interakciju sa nekim makromolekulom u ćeliji, što je najčešće molekul DNK, govorimo o **direktnom dejstvu zračenja**.
4. **Biološka faza** je najduža faza i može trajati od nekoliko minuta do nekoliko godina. U ovoj fazi dolazi do reparacije nastalih oštećenja. Ukoliko reparacija izostane ili je neuspešna doći će do nastanka promena u ozračenom organizmu. Promene su posledica inhibicije deobe ćelija, ćelijske smrti ili maligne transformacija ćelija, što se u kasnijem periodu života može ispoljiti pojavom oboljenja kod ozračene jedinke ili kod potomaka.

¹⁷ U zavisnosti od energije neutrona moguće su tri vrste interakcije: 1. elastično rasejanje, predstavlja interakciju neutrona malih energija sa jezgrom atoma, pri čemu neutron predaje deo energije i menja svoj pravac kretanja. 2. neelastično rasejanje, predstavlja interakciju neutrona velikih energija sa jezgrom atoma, pri čemu neutron predaje deo energije jezgru koje postaje nestabilno i raspada se u novo jezgro uz emisiju zračenja. 3. neutronska zahvat, neutron prolazi pored jezgra koje ga zahvata pri čemu nastaje novo nestabilno jezgro koje se raspada uz emisiju zračenja.

8.1. Teorija direktnog dejstva zračenja na živu materiju

Pri prolasku kroz ćeliju, zračenje može da stupi u interakciju sa bilo kojim biomolekulom. U osnovi teorije direktnog dejstva zračenja je direktna interakcija zračenja i ciljnog (kritičnog) molekula u ćeliji, usled čega dolazi do kidanja hemijskih veza i narušavanja njegove molekularne strukture. Za integritet ćelije posebno je bitno ukoliko je molekul DNK meta direktne jonizacije. Nastale strukturne promene se mogu otkloniti procesima reparacije. Ukoliko je proces reparacije neuspešan ili reparacija potpuno izostane, može doći do poremećaja funkcije ćelije, ćelijske smrti ili maligne transformacije ćelije.

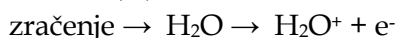
Ova vrsta interakcije je karakteristična za zračenja visokog LET-a. Oštećenja molekula DNK mogu izazvati i zračenja niskog LET-a, tako što će sekundarni elektron, oslobođen nakon apsorpcije X ili gama zraka stupiti u interakciju sa molekulom DNK.

8.2. Teorija indirektnog dejstva zračenja na živu materiju

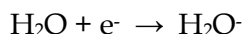
Teorija indirektnog dejstva zračenja zasniva se na stvaranju slobodnih radikala nastalih kao posledica radiolize vode u ćeliji. Zbog visokog sadržaja vode u ćelijama (može biti do 80%) velika je verovatnoća da će zračenja stupiti u interakciju prevashodno sa molekulima vode.

Slobodni radikali su hemijski veoma reaktivne elektroneutralne strukture, atomi ili molekuli, koje imaju nesporen elektron u poslednjem energijskom nivou, zbog čega veoma lako primaju ili otpuštaju elektron kako bi postigli stabilno stanje.

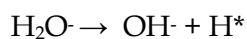
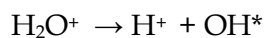
Radioliza vode je složen proces koji se odvija u milionitim delovima sekunde. Prilikom interakcije elektromagnetnog jonizujućeg zračenja ili neke naelektrisane čestice (kao što je β^- čestica) sa molekulom vode, dolazi do njegove jonizacije. Ovom interakcijom nastaju pozitivan jon H_2O^+ i slobodni elektron (e^-):



H_2O^+ je i jon i slobodni radikal jer ima jedan orbitalni elektron manje i pozitivno je naelektrisan zbog gubitka e^- . Slobodni elektron se kreće velikom brzinom i sudara sa okolnim molekulima, najčešće vode. Pri tome, molekul vode prima slobodni elektron i nastaje negativno naelektrisan jon vode (H_2O^-):



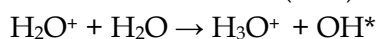
Pozitivno i negativno naelektrisani joni vode su veoma nestabilni i trenutno se razgrađuju:



Iz ovih reakcija nastaju dva stabilna jona (H^+ i OH^-) i dva hemijski veoma reaktivna radikala, H^* i OH^* (vodonični i hidrosilni radikal), koji nemaju naelektrisanje, a zbog

nesparenog elektrona imaju veoma visok afinitet ka stupanju u hemijske reakcije sa okolnim molekulima.

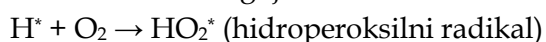
Pozitivni joni vode mogu da reaguju i sa drugim molekulima vode pri čemu nastaju hidronijum jon (H_3O^+) i hidroksilni slobodni radikal (OH^*):



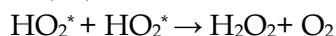
Vek trajanja slobodnih radikala je svega nekoliko milisekundi, i u tom kratkom vremenskom periodu oni stupaju u reakciju sa drugim molekulima ili međusobno. Slobodni radikali se mogu restituisati vodoničnim donorskim jedinjenjima, kao što su tiol i cistein. U reakciji sa drugim molekulima nastaju novi, odnosno sekundarni slobodni radikali, koji su i sami veoma toksični.

Međutim, ako slobodni radikali stupe u reakcije sa kiseonikom ili jedinjenjima sličnim kiseoniku, njihova štetnost se povećava. Ovaj fenomen se naziva „efekat kiseonika“ i njime se objašnjava povećanje molekularnih i ćelijskih oštećenja u prisustvu kiseonika.

Kiseonik ima svojstvo da intenzivno reaguje sa H^* radikalom na sledeći način:



Hidroperoksilni radikal (HO_2^*) je izuzetno jak oksidans čiji se hemijski efekat pridodaje učinku OH^* radikala. Reakcijom dva HO_2^* radikala nastaju dva jaka oksidansa vodonik peroksid (H_2O_2) i atomski kiseonik (O_2):



Nastali vodonik peroksid lako prolazi kroz ćelijsku membranu, razgrađuje se delovanjem katalaze i pojedinih peroksidaza.

8.3. Oštećenja na nivou ćelija izazvana zračenjem

Stepen oštećenja u ćeliji izazvan zračenjem zavisi od: vrste zračenja, doze, brzine doze zračenja (vremenska distribucija zračenja) i mesta unutar ćelije gde zračenje stupa u interakciju sa biomolekulima (prostorna raspodela). Vremenska distribucija zračenja je veoma važan faktor koji ukazuje na vremenski period nastanka sublezija na biomolekulima. Ukoliko promene na biomolekulima nastanu u neposrednoj blizini, ali u različitom vremenskom periodu, postoji velika verovatnoća da će doći do njihove reparacije i izostanka interakcije. U slučaju da na biomolekulima nastanu prostorno i vremenski bliske sublezije, velika je mogućnost za njihovu interakciju, čime se povećavaju štetni efekti zračenja.

Male doze zračenja niskog LET-a uglavnom izazivaju vremenski i prostorno udaljene sublezije u ćeliji, pa je mala verovatnoća da će doći do interakcija nastalih sublezija. Međutim, ukoliko se doza zračenja poveća, raste i broj sublezija, pa samim tim raste i verovatnoća da će sublezije stupiti u interakciju, čime se povećava stepen oštećenja ćelije. Zračenja visokog LET-a dovode do guste jonizacije unutar ćelije, čak i pri malim dozama, tako da su nastala oštećenja prostorno i vremenski blizu, i sublezije mogu da stupe u interakciju.

Na težinu nastalih primarnih oštećenja u ćeliji utiče i koncentracija kiseonika i to tako što sa povećanjem njegove koncentracije u ćeliji, raste i stepen nastalih radijacionih oštećenja („efekat kiseonika“). Ukoliko je organizam izložen dejstvu zračenja niskog LET-a, efekat kiseonika je veoma izražen i utiče na stepen nastalih oštećenja, dok u slučaju ozračivanja zračenjem visokog LET-a, koncentracija kiseonika u ćelijama ne utiče na stepen nastalih oštećenja.

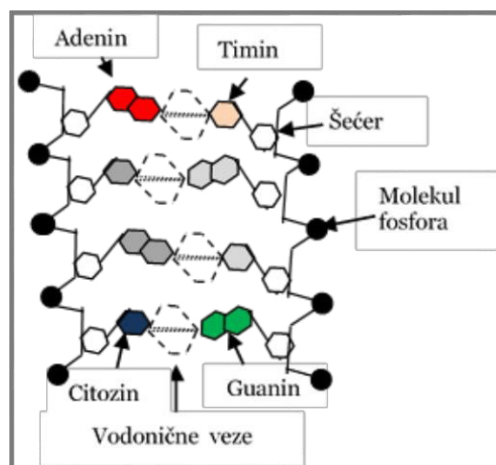
Prolaskom zračenja kroz ćeliju moguća su tri ishoda: zračenje može da prođe kroz ćeliju *bez stupanja u interakciju* sa biomolekulima, može da stupi u *interakciju* sa biomolekulima i prouzrokuje oštećenja koja mogu biti *reparabilna* ili *nereparabilna*. Izostanak reparacije ili neuspešna reparacija dovode do poremećaja funkcije ćelija, ćelijske smrti ili maligne transformacije ćelija. Mrtve ćelije organizam eliminiše, ali ukoliko njihov broj pređe određenu granicu javlja se poremećaj funkcije ozračenog organa, ponekad i smrt ozračene jedinice.

Svi delovi ćelije, odnosno subćelijske strukture, nisu podjednako osetljivi na zračenje. Smatra se da je jedro oko hiljadu puta osetljivije na zračenje u odnosu na citoplazmu. Oštećenja mitohondrija, lizozoma i ćelijske membrane mogu izazvati poremećaj funkcije ćelije. Svaka ćelija se sastoji od oko 80% molekula vode, 15% proteina, 2% lipida, 1% ugljenohidrata, 1% nukleinskih kiselina i 1% čine svi ostali molekuli. Pored strukturnih oštećenja molekula DNK, označenog kao ciljni molekul, u ozračenoj ćeliji mogu nastati promene i na drugim subćelijskim strukturama.

8.3.1. Dejstvo zračenja na nukleinske kiseline

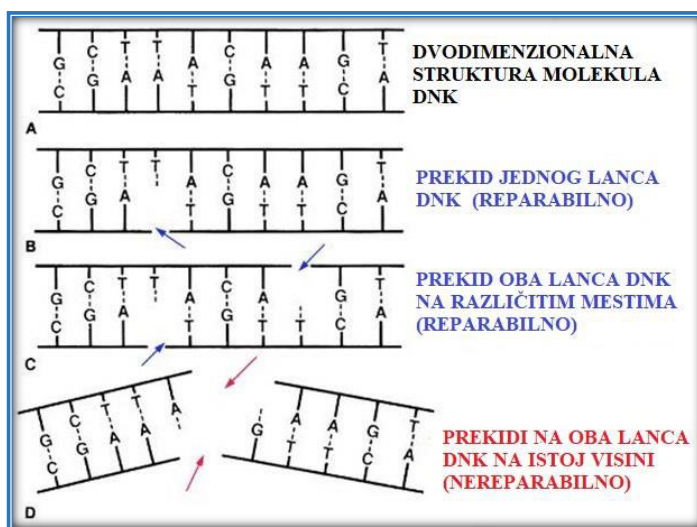
Nukleinske kiseline, DNK i RNK, su složeni molekuli građeni od velikog broja nukleotida¹⁸ (slika 13). Molekul DNK ima dvostruku spiralnu strukturu i sastoji se od dva komplementarna lanca DNK međusobno povezanih vodoničnim vezama između baza.

¹⁸ Nukleotidi su estri nukleozida i fosforne kiseline u lancu povezani fosfodiesterkim vezama između pentoze jednog nukleotida i pentoze narednog nukleotida u lancu. Nukleozidi se sastoje od azotne baze, i to purinske (adenin – A i guanin – G) ili pirimidinske baze (timin – T i citozin – C, uracil – U kod RNK), šećera pentoze (dezoksiriboze - DNK ili riboze - RNK) i fosforne kiseline. Azotna baza i pentoza su u nukleozidu vezani N-glikozidnim vezama.



Slika 13. Šematski prikaz građe molekula DNK.

Direktnom interakcijom zračenja ili interakcijom slobodnih radikala sa molekulom DNK mogu nastati: prekidi na jednom lancu DNK, prekidi na oba lanca DNK (slika 14) i oštećenja baze. Kao posledica ovih oštećenja može doći do unakrsnog povezivanja u okviru jednog ili oba lanca molekula DNK, ili do unakrsnih povezivanja molekula DNK sa proteinima.



Slika 14. Oštećenja molekula DNK izazvana zračenjem.

Jednostruki prekidi lanca DNK su uglavnom reparabilni zbog postojanja očuvanog komplementarnog lanca. Dvostruki prekidi DNK nastaju kada se dva lanca istovremeno prekinu na približno istim mestima; uglavnom su nereparabilni i dovode do nastanka hromozomskih aberacija. Ukoliko se prekidi dogode istovremeno na oba lanca molekula DNK, ali na prostorno udaljenim mestima, oštećenja su reparabilna jer postoji očuvan komplementarni lanac. Prekinuti delova lanca mogu se povezati i međusobno (DNK-DNK povezivanje) ili sa proteinima iz okruženja (DNK-protein povezivanje).

8.3.2. Mutacije i hromozomske aberacije

Promene u genetskom materijalu izazvane dejstvom zračenja ili nekih drugih štetnih faktora nazivaju se mutacije. Mutacije mogu biti somatske i genetske. **Somatske mutacije** se ispoljavaju tokom života ozračene jedinke u vidu različitih poremećaja ili malignih bolesti i ne prenose se na potomstvo. **Genetske mutacije** su posledica ozračivanja gonada i prenose se na potomstvo. **Epigenetske mutacije** su promene u ekspresiji gena koje nisu praćene promenama u sekvenci molekula DNK¹⁹. Istraživanja pokazuju da faktori iz životne sredine, uključujući i jonizujuće zračenje, mogu dovesti do pojave epigenetskih mutacija. Ove mutacije su mitotski nasledne, mogu dovesti do pojave malignih oboljenja, utiču na starenje kod ljudi i pretpostavlja se da se mogu preneti na potomstvo.

U zavisnosti od toga koliki je deo genetskog materijala oštećen mutacije mogu biti:

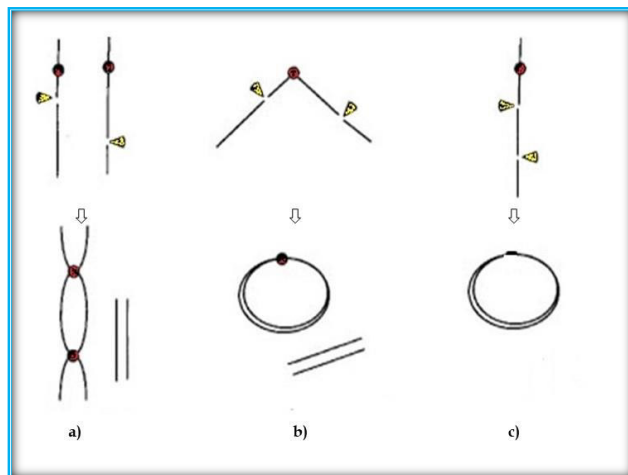
- genske ili tačkaste, nastaju kao posledica promena pojedinačnih gena;
- strukturne hromozomske aberacije, nastaju usled promena u strukturi hromozoma i
- numeričke hromozomske aberacije koje predstavljaju promene u broju hromozoma.

Genske mutacije²⁰ mogu nastati: supstitucijom (zamenom) baznog para, insercijom (umetanjem) većeg broja baznih parova ili delecijom (gubitkom) baznih parova.

Strukturne hromozomske aberacije, dicentrični i prstenasti hromozomi, imaju veliki značaj u biodozimetriji u proceni izloženosti profesionalno izloženih lica jonizujućem zračenju (slika 15).

¹⁹ Najvažniji epigenetski mehanizmi su: metilacija molekula DNK, odnosno dodavanje metil grupe i postranslaciona modifikacija histona. Oba mehanizma mogu uticati na ekspresiju gena ili dovesti do njegovog utišavanja.

²⁰ Mutacije se ne mogu detektovati konvencionalnim metodama, što je značajno prilikom proučavanja efekata niskih doza zračenja, i imajući uvek u vidu da su posledice mutacija stohastički efekti zračenja koji se kod osetljivih osoba mogu ispoljiti i posle 20 do 30 godina. Mutacije izazvane zračenjem mogu biti dominantne i recesivne. Dominantne mutacije postaju odmah vidljive i manifestuju se skraćanjem života ozračene jedinke, smanjenjem broja potomaka i teratogenim efektima na potomstvu. Recesivne mutacije se ispoljavaju kada se sretnu dve jedinke nosioci mutacija, zbog čega veoma dugo mogu da ostanu neotkrivene.



Slika 15. Šematski prikaz nastanka strukturnih hromozomskih aberacija: a) Dicentrični hromozom – hromozom sa dve centromere. Ova promena nastaje u interfazi ćelijskog ciklusa. Zbog prekida na hromozomu nastaju dva fragmenata sa centriolom, koji se mogu povezati i tako nastaje dicentrični hromozom i dva acentrična fragmenta. Prstenasti (eng. „ring“ hromozom) hromozomi nastaju zbog prekida na hromozomima praćenim gubitkom telomera, zbog čega krajevi hromozoma postaju lepljivi i spajaju se u prstenastu strukturu. Mogu nastati: prstenasti hromozom sa centromerom i pojavom acentričnih fragmenata (b) ili prstenasti hromozom bez centromere (c).

8.3.3. Dejstvo zračenja na proteine i enzime

Proteini su polimeri aminokiselina međusobno povezanih peptidnom vezom između amino (NH_2) grupe i karboksilne grupe (COOH) druge aminokiseline. Zračenje može izazvati promene na bočnim lancima proteina ili promene njihove konfiguracije²¹ čime se menjaju njihova fizičko-hemijska i biološka svojstva. Radijaciono-hemijska oštećenja proteina dovode do poremećaja njihovih glavnih funkcija: enzimskih, receptorskih i hormonalnih.

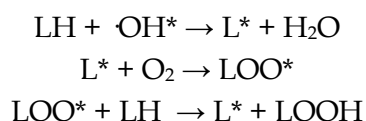
Enzimi nisu okarakterisani kao target molekuli za dejstvo zračenja zbog njihovog velikog broja u ćeliji i njihove brze zamene. Da bi došlo do njihove inaktivacije potrebno je da doza zračenja bude visoka (preko 1 Gy).

²¹ Postoji četiri nivoa u organizaciji strukture proteina: 1. Primarna struktura proteina predstavlja redosled povezivanja aminokiselina u polipeptidni lanac. 2. Sekundarna struktura proteina se odnosi na prostorni raspored polipeptidnog niza (α -spirala, β -nabrana struktura). 3. Tercijarna struktura nastaje daljim uvijanjem polipeptida u prostoru. 4. Kvaternerna struktura se odnosi na molekul koji se sastoji od dva i više polipeptidnih lanaca.

8.3.4. Dejstvo zračenja na lipide

Lipidi su organski molekuli i sastavni su deo različitih membrana (ćelijskih, mitohondrijalnih, lizosomalnih, nukleusnih, itd.). Najbrojniji su prosti lipidi koji predstavljaju estre masnih kiselina sa alkoholom.

Promene izazvane zračenjem na ćelijskim membranama nastaju zbog stvaranja slobodnih radikala i peroksidacije lipida ćelijskog membranoznog sistema. Lipidnu peroksidaciju započinje hidrosil radikal (OH^*) koji uklanja vodonikov atoma iz masnih kiselina (LH), pri čemu nastaje lipidni radikal (L^*), koji u prisustvu molekularnog kiseonika (O_2) prelazi u veoma reaktivni lipidni peroksil radikal (LOO^*). Lipidni peroksil radikal preuzima vodonikov atom sa susednog lipida (LH) i formira lipidni hidroperoksid (LOOH):



Lipidni radikali stupaju u interakciju sa susednim lipidima čime započinje lančana reakcija koja dovodi do oksidacije i degradacije lipida.

Promene na membranama nastaju uglavnom izlaganjem većim dozama zračenja, karakteriše ih gubitak fluidnosti membrana, povećanje propustljivosti ćelijske membrane za male molekule i jone, opadanja vrednosti membranskog potencijala i ruptura ćelije.

8.3.5. Dejstvo zračenja na ugljene hidrate

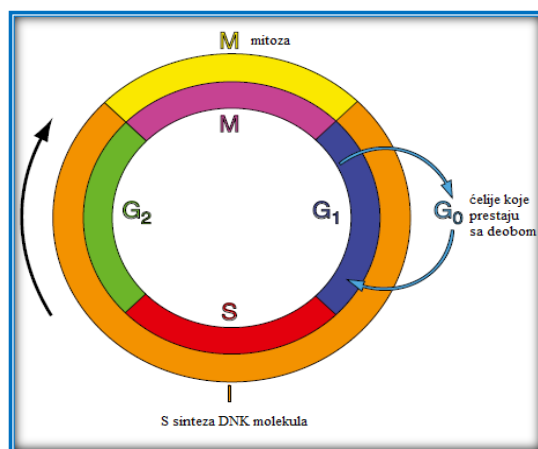
Ugljeni hidrati su polihidroksilni aldehidi ili polihidroksilni ketoni i zajedno sa proteinima i mastima predstavljaju osnovnu komponentu bioloških sistema. Efekti zračenja na ugljene hidrate zavise od doze zračenja i svode se na razlaganje ugljenih hidrata na subjedinice. U anaerobnim uslovima dolazi do njihovog unakrsnog povezivanja i formiranja polimera.

9. RADIOBIOLOGIJA II

Kod višćelijskih organizama tokom života odvija se kontinuirano stvaranje novih i uklanjanje ostarelih ćelija kao rezultat kontrolisane ćelijske proliferacije (mitoze) i ćelijske smrti (apoptoze). Ćelijski ciklus obuhvata vreme i događaje koji se dešavaju od nastanka ćelije do završetka njene deobe. Dužina ćelijskog ciklusa zavisi od vrste ćelija, i može trajati od 1,5 do 2 sata kod ćelija kvasca koje rastu, do nekoliko godina kod ćelija jetre čoveka.

Ćelijski ciklus se odvija kroz dve faze (slika 16):

- interfazu, tokom koje se mogu uočiti tri perioda: presintetski (G_1), sintetski (S) i postsintetski period (G_2)²² i
- mitozu (M faza).



Slika 16. Šematski prikaz ćelijskog ciklusa.

U fazi mirovanja (G_0) trajno se nalaze zrele ćelije koje se ne dele, a može biti i privremeno stanje za ćelije koje se retko dele. Osetljivost ćelija na zračenje zavisi od više faktora: faze ćelijskog ciklusa, količine kiseonika u ćeliji, stepena spiralizacije hromozoma, hidratacije ćelija i dr. Tokom perioda interfaze zračenje može da dovede do oštećenja genetskog materijala ili da utiče na ćeliju tako što će dovesti do gubitka sposobnosti za započinjanje nove deobe. Izostanak reparacije ili neuspešna reparacija nastalih oštećenja dovode do pojave vidljivih hromozomskih aberacija tokom mitoze.

Osetljivost ćelija na zračenje je uglavnom najveća u fazi mitoze i kasnoj G_2 fazi, dok su ćelije najotpornije na zračenje na početku G_1 faze ćelijskog ciklusa i u kasnoj S fazi. Ukoliko prekid na hromozomu nastane pre S faze, onda se prilikom replikacije molekula DNK

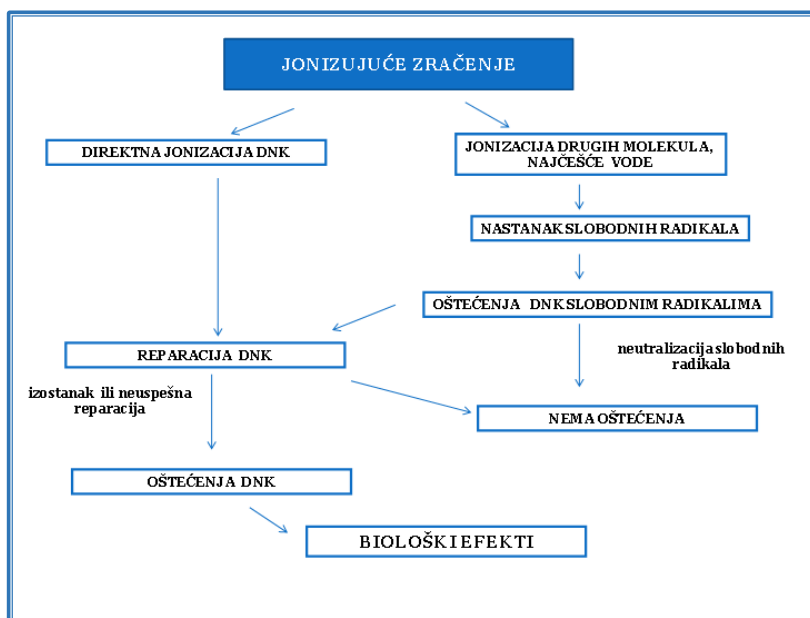
²² Tokom presintetskog perioda (G_1) hromozomi se sastoje od samo jedne hromatide, u sintetskom periodu (S) odvija se replikacija molekula DNK i nastaju dve kopije svakog hromozoma, u postsintetskom periodu (G_2) hromozomi se sastoje od dve sestrinske hromatide, a ćelija nastavlja sa rastom i priprema se za deobu.

duplira i nastali prekid. Usled ovoga javljaju se tzv. *abercije hromozomskog tipa*, kod kojih obe sestrinske hromatide imaju prekid na istom mestu. Ako se prekid dogodi posle S faze, nastaju *hromatidne aberacije*.

9.1. Reparacija radijacionih povreda

Reparacija radijacionih oštećenja je jedan od najznačajnijih bioloških fenomena. Jonizujuće zračenje može izazvati mutacije i hromozomske aberacije, malignu transformaciju ćelije ili ćelijsku smrt (slika 17).

Zahvaljujući postojanju prirodnih ćelijskih mehanizama, najveći broj oštećenja izazvanih zračenjem biva otklonjeno. Uspešnost reparacije zavisi od više faktora, kao što su doza i brzina doze, vrsta ozračenog tkiva, starost organizma i dr. Međutim, ukoliko je reparacija nemoguća, neuspešna ili neprecizna, može nastupiti ćelijska smrt. Ako oštećene ćelije prežive, kod njih se uglavnom javljaju mutacije i hromozomske aberacije koje mogu biti uzrok nastanka malignih oboljenja.



Slika 17. Šematski prikaz mehanizma dejstva jonizujućeg zračenja na ćeliju.

Reparacija molekula DNK može se odvijati u periodu pre replikacije (S faze) i posle replikacije. Sam proces reparacije se nalazi pod kontrolom seta specifičnih gena koji kodiraju enzime odgovorne za reparaciju oštećene DNK. Oštećenja na molekulu DNK se mogu otkloniti na više načina: uklanjanjem oštećenih baza ili nukleotida, reparacijom pogrešno sparenih baza, rekombinacionom reparacijom kojom se popravljaju dvolančani prekidi molekula DNK i dr.

9.2. Smrt ćelija izazvana zračenjem

Oštećenja u ćeliji izazvana dejstvom zračenja mogu biti reparabilna (subletalna) ili nereparabilna (letalna). Ćelijska smrt izazvana zračenjem može biti: **reproduktivna ili mitotska smrt**, i javlja se kod ćelija u deobi, i **interfazna** kod ćelija pre deobe, odnosno kod ćelija koje se ne dele. Reproductivna smrt nastaje samo kod ćelija koje su sposobne za deobu tokom života i manifestuje se gubitkom sposobnosti ćelija za deobu. Ćelije ozračene tokom mitoze uglavnom su odmah ubijene, dok ćelije koje u tom trenutku nisu u deobi umiru tokom sledećeg mitotskog ciklusa. Male do umerene doze zračenja dovode do reproduktivne smrti proliferativnih ćelija. Za razliku od reproduktivne smrti, interfazna smrt nije ograničena na proliferativne ćelije i može se javiti kod bilo kog tipa ćelija usled delovanja relativno visokih doza jonizujućeg zračenja.

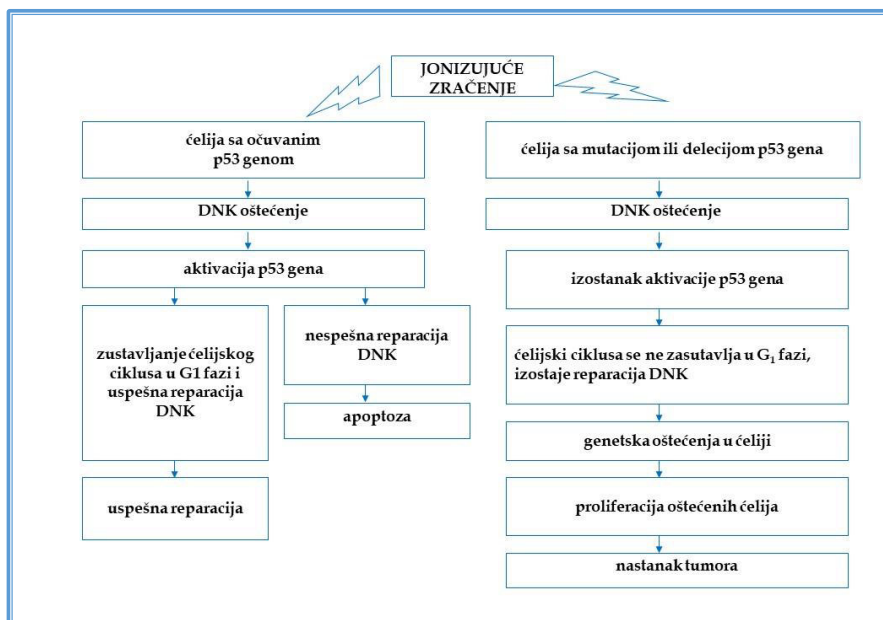
Apoptoza i nekroza su najvažniji mehanizmi ćelijske smrti nakon zračenja. Kod ćelija oštećenih zračenjem može se javiti i mitotska katastrofa, starenje ili autofagije. **Apoptoza** ili programirana ćelijska smrt je glavni kontrolni mehanizam kojim se uklanjaju ćelije se velikim oštećenjima na molekulu DNK posle ozračivanja malim do umerenim dozama zračenja. Ukoliko su ćelije ozračene visokim dozama zračenja dolazi do **nekroze ćelija** kao posledica oštećenja ćelijske membrane.

Mitotska katastrofa označava odloženu mitotsku smrt ćelija. Ozračene ćelije kod kojih su nastala velika oštećenja na hromozomima i drugim strukturama neophodnim za odvijanje procesa ćelijske deobe ne mogu da prođu kroz M fazu ćelijskog ciklusa, zbog čega takve ćelije umiru u M fazi (**mitotska smrt**). Ponekad se ovakve ćelije ipak podele i pređu u G₁ fazu ćelijskog ciklusa gde može doći do aktivacije drugih mehanizama ćelijske smrti. Međutim, ako smrt izostane, ove ćelije mogu biti osnova za nastanak malignih oboljenja.

Starenje ćelija (senescencija) može biti replikativna, kao posledica skraćivanja telomera, ili prerana, kada je izazvana oštećenjima na molekulu DNK. Predstavlja tumor supresivni mehanizam jer se ovakve ćelije ne dele.

Autofagija je mehanizam ćelijske smrti koji se javlja u odsustvu apoptoze, ili kod ćelija kod kojih postoje oštećenja u apoptotskim putevima.

U regulaciji reparacije ozračenih ćelija ili pokretanju apoptoze, značajnu ulogu imaju tumor supresorski geni, p53 i Rb (retinoblastoma). Zračenje može izazvati oštećenja tumor supresorskih gena i na taj način dovesti do pojave malignih oboljenja. Protein p53 je produkt homolognog tumor supresorskog gena TP53 koji aktiviran deluje na nekoliko načina: aktivira proteine neophodne za reparaciju oštećene DNK, zaustavlja ćelijski ciklus u G₁/S fazi i time omogućava reparaciju ćelije pre ulaska u sledeću fazu ćelijskog ciklusa, a može i da pokrene proces apoptoze čime se uklanjaju oštećene ćelije (slika 18). Mutacije u tumor supresorskom genu TP53 dovode se u vezu sa pojavom malignih oboljenja kod ljudi, pasa i mačaka.



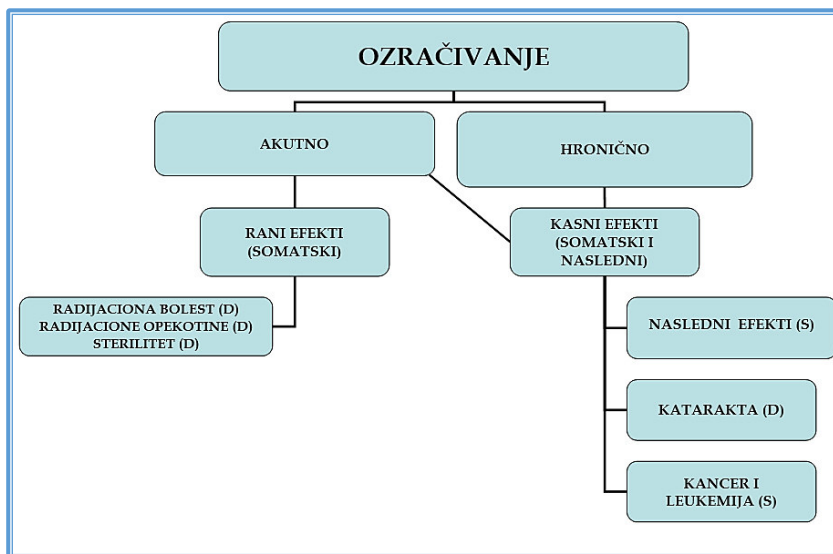
Slika 18. Uloga tumor supresorskog gena p53 u malignoj transformaciji ćelija i nastanku tumora.

Porodica retinoblastoma (Rb) se sastoji od tri gena: Rb, p107 i p130 koji proizvode proteine koji imaju ulogu u proliferaciji i diferencijaciji ćelija. Gen retinoblastoma je prvi otkriven tumor supresorski gen koji učestvuje u regulaciji ćelijskog ciklusa u G₁ fazi. Mutacije ili delecije ovog gena dovode do proliferacije oštećenih ćelija i nastanka tumora kod ljudi i životinja. Pored zračenja, oštećenja tumor supresorskih gena mogu biti izazvana i drugim mutagenima.

9.3. Efekti zračenja na organizam

Izlaganjem organizma zračenju, jednokratno (**akutna ekspozicija**) ili tokom dužeg vremenskog perioda (**hronična ekspozicija**), mogu nastati štetni efekti čiji će intezitet zavisiti od vrste zračenja, doze i brzine doze. Nastali štetni efekti se mogu podeliti na stohastičke i determinističke (nestohastičke) efekte, rane (akutne) i kasne, somatske, nasledne (genetske, hereditarne) i teratogene efekte (slika 19).

Radiobiološka reakcija je reakcija sa pragom, što znači da je za pojavu bioloških oštećenja potrebno da organizam primi određenu dozu zračenja. Ova prag doza je definisana kao **maksimalno dozvoljena doza** (MDD) i na osnovu nje se određuju norme sigurnosti za stanovništvo i lica profesionalno izložena zračenju.



Slika 19. Biološki efekti zračenja
(D - deterministički efekti zračenja, S - stohastički efekti zračenja).

Deterministički efekti zračenja su dozno zavisni efekti koji se ispoljavaju kada organizam primi dozu zračenja veću od praga doze. Pojava i intezitet nastalih štetnih efekata zavise od jačine apsorbovane doze, brzine doze i načina ozračivanja. U determinističke efekte spadaju radijaciona bolest (radijacioni sindrom), radijacione opekotine, sterilitet, hipotireoidizam i katarakta.

Stohastički efekti zračenja su efekti čija se verovatnoća pojave, povećava sa dozom zračenja. Ovi efekti nemaju prag doze, smatra se da ne postoji bezbedna doza zračenja, odnosno da je svaka doza zračenja, pa čak i najmanja, potencijalno opasna. Stohastički efekti se smatraju glavnim zdravstvenim rizikom kod profesionalno izloženih lica koja rade u zoni zračenja. U stohastičke efekte zračenja spadaju pojava karcinoma, leukemije (somatski efekti) i nasledni (genetski) efekti.

Mutacije u somatskim ćelijama se ne prenose na potomstvo i mogu se ispoljiti u vidu poremećaja zdravstvenog stanja ozračene jedinke (somatski efekti zračenja). Somatski efekti zračenja mogu biti stohastički (karcinom, leukemija, skraćenje života) i deterministički (radijacioni sindrom, eritem, katarakta). U zavisnosti od dužine vremena koje protekne od ozračivanja do pojave somatskih efekata, oni mogu biti *rani* (akutni) i *kasni*. Promene koje nastaju neposredno ili u roku od nekoliko dana posle ozračivanja srednjim i visokim dozama zračenja nazivaju se **rani efekti** zračenja i ispoljavaju se u vidu radijacione bolesti, opekotina i steriliteta. Ovi efekti su uglavnom posledica akcidentalnih ozračivanja. **Kasni efekti** zračenja se ispoljavaju u vidu katarakte, karcinoma, leukemije i skraćenja životnog veka ozračenih jedinki. Nastaju usled hroničnog ozračivanja celog tela malim dozama zračenja, javljaju se i kao kasne komplikacije radioterapije ili nekoliko meseci ili godina posle akcidentalnog ozračivanja celog tela visokim dozama zračenja.

Genetske (nasledne) mutacije nastaju ozračivanjem gonada i prenose se na naredne generacije. Značajne su samo ako se dogode u toku reproduktivne faze života ozračene jedinke. Spadaju u stohastičke efekte zračenja, jer ne postoji prag doze za ove promene, ali je

dokazana linearna zavisnost između učestalosti pojavljivanja genetskih poremećaja kod potomaka i doze koju su roditelji primili. Genetske efekte zračenja teško je dokazati zbog prisustva drugih mutagena u životnoj sredini.

Teratogeni efekti zračenja nastaju ozračivanjem fetusa tokom intrauterinog razvoja. Posledica ozračivanja su tzv. embrionalne mutacije, naročito ispoljene na onim organima koji su za vreme ozračivanja bili u razvoju. Ozračivanje fetusa se može desiti u fazi pre implatacije oplođene jajne ćelije, u fazi organogeneze i u fazi rasta ploda. Stepenn nastalih oštećenja zavisi od doze i brzine doze, kao i faze intrauterinog razvoja ploda. Posledice mogu biti: fetalna ili neonatalna smrt, malformacije, retardacije, kongenitalni efekti i nastanak malignih oboljenja.

U fazi pre implatacije, ćelije embriona su totipotentne što objašnjava činjenicu da vremenski kratka ekspozicija visokim dozama zračenja može ubiti embrion, ali ne može indukovati malformacije. Kaže se da u ovoj fazi zračenje ima efekat „sve ili ništa“, jer ćelije nisu diferencirane, pa smrt jedne ili više ćelija ne ugrožava dalji razvoj embriona. Nakon implatacije oplođene jajne ćelije počinje faza morfogeneze tokom koje se formiraju različita tkiva i organi. Ozračivanje embriona u ovom periodu dovodi do nastanka malformacija. U zadnjoj trećini graviditeta plod je otporniji na zračenje, mada pojedini podaci ukazuju da izlaganje ljudskog fetusa zračenju u kasnijim fazama graviditeta utiče na razvoj centralnog nervnog sistema. Eksperimentima na pacovima, miševima i psima je utvrđeno da doze zračenja od 100 mGy i veće (X i gama zračenja) imaju teratogene efekte.

Pojava **malignih oboljenja** izazvanih jonizujućim zračenjem spada u stohastičke efekte zračenja. Najčešće su posledica tačkastih mutacija na molekulu DNK, inaktivacije ili delecije tumor supresorskih gena i aktivacije onkogeni u ćeliji. Klinički i patohistološki ovi tumori se ne razlikuju od drugih vrsta tumora, tako da je teško njihovu pojavu dovesti u vezu sa zračenjem. Stoga se kaže da zračenje povećava verovatnoću za nastanak tumora.

U nastanku tumora izazvanih zračenjem značajnu ulogu imaju starost jedinke u vreme ozračivanja, pol, nasledni faktori i vrsta ozračenih organa. Najvažniji faktor je svakako starost jedinke, jer kod jedinki ozračenih u ranom periodu života raste verovatnoća za pojavu malignih oboljenja u kasnijem periodu života. Kod pasa ozračenih u toku prenatalnog perioda i neposredno po rođenju, uočena je veća incidenca malignih oboljenja tokom života.

Promene u organizmu izazvane jonizujućim zračenjem zavise od osetljivosti ozračenih tkiva i organa, odnosno od njihove radiosenzitivnosti. Organi i tkiva koji pokazuju više izražene makroskopske i mikroskopske promene nazivaju se **radiosenzibilni**, dok oni kod kojih se promene ne javljaju ili su manje izražene nazivaju se **radiorezistentni**. Radiosenzitivnost pojedinih tkiva i organa se razlikuje, ali i različite ćelije jednog organa nisu podjednako osetljive na zračenje i nemaju istu sposobnost regeneracije nakon ozračivanja.

Naučnici Bergonije i Tribund su 1906. godine definisali zakon o radiosenzitivnosti tkiva i organa na dejstvo X zračenja: „Osetljivost pojedinih tkiva i organa na X zračenje je veća ukoliko njihove ćelije imaju veću sposobnost deobe i ako se nalaze na nižem stepenu embrionalne diferencijacije“. Prema osetljivosti na zračenje ćelije i tkiva sisara se mogu podeliti u tri grupe: veoma osetljive, umereno osetljive i najmanje osetljive (tabela 8).

Tabela 8. Osetljivost ćelija i tkiva sisara na zračenje.

Veoma osetljive ćelije i tkiva	Limfociti, limfoblasti, koštana srž, limforetikularno tkivo, nezrele krvne ćelije, spermatogonije, ovarijalni folikuli, intestinalni epitel i epitelne ćelije očnog sočiva.
Umereno osetljive ćelije i tkiva	Endotelne ćelije krvnih sudova, epitelne ćelije kože, kosti i hrskavice mladih jedinki, glija ćelije, žlezdani epitel mlečne žlezde, epitelne ćelije respiratornog trakta, bubrežni epitel, epitelne ćelije endokrinih žlezda.
Najmanje osetljive ćelije i tkiva	Zrele krvne ćelije, mišićne ćelije, kosti i hrskavice odrasle jedinke, zrele vezivne ćelije i ganglioni.

U odnosu na vrednosti tkivno težinskih faktora (W_T) za ljude (tabela 2), tkiva i organi su prema osetljivosti na zračenje podeljeni u četiri grupe:

- najosetljiviji organi su: koštana srž (crvena), debelo crevo, pluća, želudac, dojke, nadbubrežne žlezde, mozak, ekstratorakalna regija, žučna kesa, srce, bubrezi, limfni čvorovi, mišićno tkivo, usna duplja, pankreas, prostata, tanka creva, slezina, timus, materica i grlić;
- veoma osetljivi organi su gonade;
- umereno osetljivi organi su bešika, jetra, jednjak i štitna žlezda, i
- najmanje osetljivi organi su koža, kosti, mozak i pljuvačne žlezde.

10. RADIOPATOLOGIJA I

Radiopatologija je naučna disciplina koja izučava nastanak i patogenezu patoloških promena izazvanih zračenjem. Oštećenja u organizmu izazvana dejstvom zračenja nazivaju se **radijacione povrede**, a nastale mikroskopske i makroskopske promene se nazivaju **radiolezije**.

10.1. Radijacione povrede

Karakter radijacionih povreda u ozračenom organizmu je isti bez obzira na vrstu zračenja koja ih izaziva. Stepennastalih oštećenja, tok bolesti i ishod radijacionih povreda se razlikuju i zavise od:

1. Načina izlaganja zračenju, koje može biti opšte, lokalno, jednokratno, višekratno, spoljašnje i unutrašnje. **Ozračivanje celog tela** ili opšte ozračivanje nastaje kada svaki gram tela ozračene jedinice primi istu dozu zračenja. Ako je samo jedan deo tela ozračen, govorimo o **lokalnom ozračivanju**. Lokalno ozračivanje je obično povoljnije po ozračenju jedinku, i u zavisnosti od primljene doze i brzine doze zračenja postoji veća mogućnost oporavka organizma. Postoji i treći vid ozračivanja koji se koristi u radijacionoj terapiji malignih oboljenja i naziva se frakcionisano ozračivanje. **Frakcionisano ozračivanje** predstavlja aplikovanje ukupne terapijske doze u više delova sa vremenskim razmacima od jednog do više dana. **Spoljašnje ozračivanje** nastaje kada se izvor zračenja nalazi van organizma (npr., ozračivanje usled prisustva prirodnih i proizvedenih radionuklida u životnoj sredini). **Unutrašnje ozračivanje** je posledica unosa radioaktivnih elemenata u organizam (npr., ingestija radionuklida prisutnih u vodi i hrani, korišćenje radiofarmaceutika u terapiji).
2. Vrste zračenja. **Alfa zračenje** se može zanemariti kao spoljašnji izvor zračenja jer ga dlaka, perje i površinski slojevi epidermisa u potpunosti apsorbuju. U slučaju unutrašnje kontaminacije alfa emiteri predstavljaju veliku opasnost jer alfa čestica na svom putu izaziva gustu jonizaciju što dovodi do oštećenja tkiva i organa. **Beta zračenje** ima veću prodornost i prodire od 5 mm do 8 mm u epidermis gde može prouzrokovati pojavu beta opekotina. Ukoliko se beta emiteri unesu u organizam ingestijom, inhalacijom ili transkutano, stepennastalih promena zavisi od rastvorljivosti radioaktivne supstance, perioda poluraspada, mesta deponovanja, brzine eliminacije, i drugih faktora. **Gama zračenje** zbog velike prodornosti predstavlja opasnost i kao spoljašnji i kao unutrašnji izvor zračenja. Specifična moć jonizacije tkiva i organa je manja u odnosu na alfa i beta čestice.

3. Doze i brzine doze (pogledati poglavlje 8.3). Da bi se ispoljili deterministički efekti zračenja organizam treba da primi određenu dozu zračenja. **Subletalna doza** je ona doza koja ne prouzrokuje smrt nijedne ozračene jedinke. Doza zračenja koja u periodu od 30 dana od ozračivanja dovede do smrti polovine od ukupnog broja ozračenih jedinki naziva se **poluletalna doza** i označava se kao **LD_{50/30}**. Period od ozračivanja do uginuća može biti kraći od 30 dana, ali ne sme biti duži od tog perioda. **Apsolutna letalna doza** je ona doza koja dovodi do uginuća svih ozračenih jedinki u roku od 30 dana i označava se kao **LD_{100/30}**. **Supraletalna doza** je doza koja je veća od letalne doze i dovodi do uginuća svih ozračenih jedinki u vremenskom intervalu kraćem od 30 dana od ozračivanja.
4. Topografskog položaja radijacionih povreda. Svi delovi tela, odnosno tkiva i organi, nisu podjednako osetljivi. Najosetljiviji delovi tela su grudna i trbušna regija, dok su ekstremiteti manje osetljivi na zračenje.
5. Osetljivosti tkiva i organa na zračenje (tabela 8). Ozračivanje radiosenzitivnih tkiva i organa može dovesti do smrti jedinke ili pojave teške kliničke slike, dok ozračivanje manje osetljivih ili otpornih tkiva i organa dovodi do pojave umerenog ili minimalnog morbiditeta.
6. Vrste organizma. Osetljivost životinja na zračenje nije ista. Na primer, sisari su osetljiviji od gmizavaca, a razlike postoje i među samim sisarima (tabela 9).

Tabela 9. Poluletalna (LD_{50/30}) i apsolutno letalna (LD_{100/30}) doza zračenja za čoveka i životinje.

Vrsta	LD _{50/30} (Gy)	LD _{100/30} (Gy)	Vrsta	LD _{50/30} (Gy)	LD _{100/30} (Gy)
Čovek	2,2–3,5	5,3	Telad do 5 meseca	2,0–2,2	2,6
Ovca	1,8–4,4	4,8–6,6	Konj	3,5–4,0	5,0–6,5
Jagnjad do 3. meseca	1,3–2,6	5,3	Magarac	2,1–5,5	7,5
Svinja	2,5–3,0	4,5	Majmun	2,5–4,0	6,0
Prasad do 2. meseca	1,8–2,6	3,9	Kokoška	5,0–7,5	8,0
Pas	2,0–3,5	4,0–5,0	Guska	9,0	-
Koza	1,8–4,4	3,5–6,6	Pacov	9,0	-
Goveda	1,4–4,8	5,7	Zmija	80,0–200,0	-

7. Starosti i pola jedinke. Osetljivost na zračenje se smanjuje sa starošću organizma, mlade jedinke su osetljivije na zračenje od odraslih. Uočene su i razlike između polova, smatra se da su ženke neznatno otpornije na zračenje od mužjaka.
8. Zdravlje, kondicija i način ishrane. Dobro izbalansirana ishrana, bogata vitaminima i proteinima, povećava otpornost organizma na zračenje. Loša ishrana, naporan rad i hladnoća povećavaju osetljivost organizma na zračenje.

10.2. Reakcija zdravog tkiva na zračenje

Promene koje se kod životinja ispoljavaju u periodu od nekoliko dana do nekoliko nedelja posle izlaganja visokim dozama zračenja nazivaju se **akutne radijacione promene**, nastaju u svim ozračenim tkivima i organima, i najbolje se uočavaju u koštanoj srži, digestivnom traktu i testisima. **Kasne radijacione promene** se javljaju posle nekoliko meseci do nekoliko godina posle izlaganja bilo akutnom, hroničnom ili frakcionisanom zračenju. Karakteriše ih dug latentni period od trenutka ozračivanja pa do pojave simptoma. Atrofija i fibroza tkiva su najčešće kasne promene koje nastaju u skoro svim ozračenim tkivima i organima.

10.2.1. Hematopoezni i limforetikularni sistem

Hematopoezne matične ćelije koštane srži predstavljaju najproliferativnije regenerativno tkivo sisara i zato su veoma osetljive na zračenje. Osetljivost krvnih ćelija na zračenja opada sa povećanjem stepena njihove diferencijacije, pa su zrele krvne ćelije, osim limfocita, otporne na dejstvo zračenja.

U koštanoj srži posle ozračivanja dolazi do smanjenje broja pluripotentnih matičnih ćelija. U slučaju ozračivanja niskim dozama zračenja (subletalne doze), dolazi do blagog smanjenje broja matičnih ćelija, i životinje se oporavljaju već posle nekoliko nedelja od ozračivanja. Sa povećanjem doze zračenja raste i vreme potrebno za oporavak. Od progenitorskih ćelija najosetljiviji na zračenje su eritroblasti (prekursori eritrocita), zatim mijeloblasti (prekursori monocita i granulocita), dok su megakariociti (prekursori trombocita) najmanje osetljivi na zračenje. Posle ozračivanja celog tela poluletalnim dozama zračenja prvo nastaje oštećenje eritroblasta praćeno poremećajem u sazrevanju prekursorskih ćelija eritroblastne loze. Retikulociti koji se nalaze u krvi nastavljaju da se diferenciraju u zrele oblike. Anemija koja se javlja par nedelja nakon ozračivanja je posledica oštećenja progenitorskih ćelija (eritroblasta), zbog čega ne nastaju novi eritrociti, dok se stari eritrociti razgrađuju i nestaju iz krvi.

Posle izlaganja životinja poluletalnim i letalnim dozama zračenja u krvi se prvo zapažaju promene u broju leukocita. Neposredno posle ozračivanja dolazi do blagog pada broja leukocita u krvi kao posledica vegetativno-vaskularnih reakcija preraspodele krvi u organizmu. Posle 6 do 8 sati od ozračivanja, broj leukocita se može povećati do 15% i na tom nivou se, u zavisnosti od doze zračenja, zadržava od 1. do 5. dana. Posle ovog perioda, a zbog oštećenja progenitorskih ćelija, dolazi do opadanja broja leukocita koji svoj minimum dostižu 2 do 3 nedelje od ozračivanja. Ukoliko životinja preživi, broj leukocita se za dve do tri nedelje vraća na normalne vrednosti.

Limfociti spadaju u najosetljivije ćelije sisara na zračenje. Čak i male doze zračenja dovode do oštećenja limfocita u koštanoj srži, limfnim čvorovima i perifernoj krvi. Dugoživeći T limfociti su otporniji na zračenje, dok su kratkoživeći B limfociti veoma osetljiviji. Zračenje direktno uništava limfocite i piknotičke promene u jedru nastaju već 30 minuta posle ozračivanja. Nakon izlaganja zračenju u krvi se prvo zapaža limfopenija (već

pri dozama od 0,1 Gy), zatim neutrofilija (doze od 0,5 Gy), pa eritropenija i trombocitopenija (doze veće od 0,5 Gy).

Zrele krvne ćelije, osim limfocita, se smatraju radiorezistentnim ćelijama. Smanjenje broja krvnih ćelija zavisi od osetljivosti matičnih ćelija na zračenje i životnog veka zrelih krvnih ćelija koji može biti od 1 dana (granulociti) do 120 dana (eritrociti). Koštana srž ima veliku sposobnost regeneracije i oporavak hematopoeze je moguć u situacijama kada više od 2% matičnih i prekursorskih ćelija ostane neoštećeno.

Trombociti su u pogledu radiosenzitivnosti manje osetljivi od leukocita, ali su osetljiviji na zračenje od eritrocita.

Organi limforetikularnog sistema zaduženog za čitav niz različitih funkcija, kao što su ćelijski i humoralni imunitet, veoma su osetljivi na dejstvo zračenja. Poluletalne i letalne doze zračenja dovode do teških vaskularnih promena u organizmu, degenerativno-nekrotičnih i atrofičnih promena u limfnim čvorovima i drugim limfoidnim tkivima. Krajem prve nedelje od ozračivanja nastaje otok limfnih čvorova, na čijem preseku se uočavaju krvarenja. U svim limfnim čvorovima, a naročito mezenterijalnim, izražena je deplecija limfocita. Slične promene nastaju i u timusu, tonzilama i solitarnim limfnim čvorovima. U pulpi slezine se javljaju difuzna krvarenja. Kao posledica nastalih oštećenja dolazi do pada imuniteta, zbog čega su česte komplikacije izazvane kako patogenim tako i uslovno patogenim mikroorganizmima.

10.2.2. Gonade

Gonade spadaju u radiosenzitivna tkiva. Efekti zračenja na gonade mogu biti somatski i nasledni (genetski).

Testisi su osetljiviji na zračenje u odnosu na jajnike. Spermatogonije, kao matične ćelije klicinog epitela, su najosetljivije na zračenje, dok su spermatoide, spermatozoidi, Leidigove i Sertolijeve ćelije rezistentnije. Promene koje zračenje izaziva u testisima ispoljavaju se u vidu poremećaja spermatogeneze (azoospermija, oligospermija) i promene hormonskog statusa jedinke.

Jajnici (ovarijumi) su otporniji na dejstvo zračenja u odnosu na testise²³. Tokom fetalnog perioda ovogonije su veoma osetljive na zračenje. Posle rođenja, ovocite, koje se nalaze u mejozi I, su relativno radiorezistentne. U radiosenzitivne ćelije jajnika spadaju ćelije granuloznog sloja de Graafovog folikula. U ovim ćelijama odvija se sinteza ženskih polnih hormona potrebnih za pripremu materice za prihvatanje oplodene jajne ćelije. Dejstvom zračenja na jajnike dolazi do redukcije broja folikula i propadanja ćelija granuloznog sloja folikula. U kasnijem periodu života kod ozračene jedinke moguća je pojava fibroze jajnika.

²³ U kori jajnika polno zrelih jedinki nalaze se primarni i sekundarni folikuli i žuta tela, između njih je stroma (intersticijum). Primordijalne klicine ćelije se dele tokom embriogeneze, od njih nastaju ovogonije, a od ovogonija primarni ovociti. Primarne ovocite ulaze u fazu sazrevanja (mejozu I) tokom fetalnog razvoja, ali je ne dovršavaju do kraja već se deoba zaustavlja u diplotenu. Ovocit ostaje u ovoj fazi tokom celog reproduktivnog perioda jedinke, a svoje razviće produžavaju tek u vreme polnog sazrevanja.

10.2.3. Digestivni trakt

Za organe digestivnog trakta u celini se može reći da spadaju u grupu radiosenzitivnih tkiva. Ishod radijacione bolesti, koja nastaje ozračivanjem celog tela ili većeg dela tela umerenim i visokim dozama zračenja, zavisi od stepena oštećenja digestivnog trakta, prvenstveno creva. Osetljivost pojedinih partija digestivnog trakta zavisi od tipa epitelnih ćelija, žlezdanih struktura i vaskularizacije. Najosetljivije su ćelije tankog creva, zatim jednjaka, želuca, debelog creva pa rektuma. Radiosenzitivnost tankog creva na zračenje je posledica visokog mitotskog indeksa ćelija crevnih kripti i dobre vaskularizacije.

Jetra spada u relativno radiorezistentni organ zbog sporog deljenja hepatocita i ćelija žučnih kanalića.

10.2.4. Koža

Koža pripada grupi radiosenzitivnih tkiva. Promene na koži izazvane zračenjem nazivaju se radiodermatitis. Po vremenu nastanka mogu biti akutni (rani) ili hronični (kasni). U zavisnosti od apsorbovane doze zračenja i prema stepenu izraženih promena na koži *akutni radijacioni dermatitis* može biti:

- I stepena (radiodermatitis erythematosa), ispoljava se u vidu eritema, epilacije, vlažne ili suve deskvamacije epitela kože,
- II stepena (radiodermatitis bullosa), manifestuje se pojavom plikova na koži, i
- III stepena (radiodermatitis ulcerosa), manifestuje se pojavom ulceracija i nekroza na koži.

Hronični radiodermatitis nastaje dugotrajnim ozračivanjem kože malim dozama zračenja. Koža je suva, ljubičasto-crvena, sa gubitkom normalnih nabora i reljefa. U slučaju ozračivanja celog tela i pojave akutnog radijacionog sindroma, kod ljudi je uvek prisutna epilacija, dok se kod životinja epilacija javlja samo kod preživara i tada predstavlja loš prognostički znak.

10.2.5. Respiratorni sistem

Organi respiratornog sistema su relativno rezistentni na zračenje i stepen nastalih oštećenja zavisi od doze zračenja. Male i subletalne doze ne izazivaju klinički vidljive simptome. Veće doze zračenja (poluletalne) dovode do promena koje nastaju kao posledica vaskularnih i vezivno tkivnih oštećenja, a manifestuju se pojavom hiperemije pluća, edema alveola, pojavom eksudata u alveolarnim prostorima i pojačanim lučenjem sluzi bronhijalnog epitela. Kod ljudi i pasa stvara se hijalinska membrana kao posledica taloženja fibrina u alveolama. Letalne doze zračenja dovode do pojave kataralne bronhopneumonije, hemoragične eksudacije i jake kongestije kapilara praćene i promenama na pleuri. Izražene su kod ovaca i koza, dok se kod svinja javlja fibropurulentna pneumonija.

10.2.6. Kardiovaskularni sistem

Promene koje zračenje izaziva u krvnim sudovima, kapilarima, arteriolama i venulama imaju važnu ulogu u patogenezi radijacionih povreda. Pojava ranih i kasnih efekata zračenja praćena je promenama u krvnim sudovima. Visoke doze zračenja izazivaju oštećenje endotelne ćelije krvnih sudova što dovodi do njihove degeneracije, bubrenja i nekroze. Bubrenjem endotelne ćelije nastaju suženja ili opstrukcije lumena krvnih sudova, a dalja oštećenja endotelne ćelije dovode do pojave trombova. Zbog povećane propustljivosti krvnih sudova dolazi do transudacije i eksudacije u okolno tkivo i smanjenja cirkulišuće zapremine krvi. Klinički se ove promene zapažaju u vidu krvarenja i pojavom edema.

Kasni efekti zračenja se manifestuju pojavom mikrovaskularnog kolapsa usled ruptуре ili dilatacije kapilara, zadebljanjem bazalne membrane i trombozom krvnih sudova. Nastala oštećenja dovode do hipoksije, nekroze i fibroze afektiranih tkiva i organa.

Kod životinja ozračenih visokim dozama zračenja i obolelih od akutnog radijacionog sindroma nastaju progresivne morfološke i funkcionalne promene u srcu. Najosetljivije ćelije srca su ćelije endokarda. Mikroskopski se u srcu uočavaju krvarenja, distrofične promene miokarda, a u težim slučajevima nastaju nekrotična žarišta bez izraženih inflamatornih promena.

11. RADIOPATOLOGIJA II

Radijacione povrede životinja se klinički mogu manifestovati u vidu akutnog radijacionog sindroma (akutna radijaciona bolest), hroničnog radijacionog sindroma (hronična radijaciona bolest), radiološkog trovanja, beta opekotina i udruženih radijacionih povreda.

11.1. Akutni radijacioni sindrom životinja

Etiologija: Akutni radijacioni sindrom (ARS u daljem tekstu), ili akutna radijaciona bolest, predstavlja skup simptoma različitih organskih sistema koji nastaju kratkotrajnim ozračivanjem celog ili većeg dela tela životinja visokim dozama gama ili neutronske zračenja (LD₅₀ i LD₁₀₀). Ispoljava se kod životinja koje se nalaze na mestu dejstva primarnog zračenja nastalog posle nuklearne eksplozije, ili u rejonu dejstva naknadnog gama zračenja usled indukovane radioaktivnosti. ARS može nastati i ponovljenim ozračivanjem životinja visokim dozama zračenja u kratkom vremenskom periodu, ili unosom velike količine radionuklida koji doprinose ozračivanju organizma dozom od 1 Gy i više.

Biološki efekti visokih doza zračenja manifestuju se pojavom **ranih**, akutnih, oštećenja i **kasnih**, hroničnih, oštećenja koja se pojavljuju u kasnijem periodu života kod preživelih jedinki. Postoje tri oblika ARS:

1. *Hematopoezni oblik*, nastaje ozračivanjem dozama od 1 Gy do 10 Gy, oštećenja su pretežno u hematopoeznom sistemu, moguć je oporavak životinja.
2. *Gastrointestinalni oblik*, nastaje ozračivanjem dozama od 10 do 50 Gy. Izražena su oštećenja u digestivnom traktu, životinje uginu obično posle osmog do šesnaestog dana.
3. *Cerebralni oblik* (CNS sindrom), nastaje ozračivanjem dozama većim od 50 Gy. Primarna oštećenja nastaju u centralnom nervnom sistemu, uginuća se javljaju prvog do trećeg dana.

Ozračivanjem celog ili većeg dela tela dozama većim od 1 Gy nastaju radijaciona oštećenja u celom organizmu, ali promene u hematopoeznom, gastrointestinalnom i nervnom sistemu su glavni uzroci uginuća životinja. Sindromi se međusobno preklapaju, tako da u slučaju ozračivanja dozama većim od 6 Gy nastaju oštećenja i hematopoeznog i digestivnog sistema.

U kliničkoj slici ARS razlikuju se četiri faze:

1. *prodromalna faza*, ili period primarne reakcije, nastaje posle ozračivanja i u zavisnosti od apsorbirane doze zračenja može trajati od nekoliko minuta (veoma visoke doze) do nekoliko nedelja (male doze),

2. *latentna faza* (skrivena faza),
3. *faza izraženih kliničkih simptoma* i
4. *faza oporavka*.

Patogeneza ARS: Nekoliko sati posle ozračivanja dozama od 1 Gy do 10 Gy u koštanoj srži dolazi do narušavanja normalne strukture, poremećaja vaskularizacije i smanjenja broja ćelija. **Hemoragični sindrom** nastaje zbog oštećenja koštane srži i supresije deobe pluripotentih matičnih ćelija, što dovodi do smanjenja broja leukocita, trombocita i eritrocita u krvi, pojave anemije i infekcija zbog poremećaja imuniteta.

Gastrointestinalni sindrom nastaje ozračivanjem životinja dozama većim od 10 Gy koje dovode do poremećaja funkcije hematopoeznog sistema i digestivnog trakta. Zbog oštećenja resica crevnog epitela i pojave profuznih proliva smanjuje se resorpcija hranljivih materija i vode, kod ozračenih životinja dolazi do dehidracije i gubitka elektrolita. Smanjenje opšte otpornosti organizma i oštećenja crevnog epitela omogućavaju prodor patogenim i uslovno patogenim mikroorganizmima iz creva u krvotok, zbog čega se javljaju bakterijemija i septikemija. Kod životinja se javljaju krvarenja i anemija kao posledica trombocitopenije i eritropenije. Uginuća nastaju usled dehidracije, gubitka elektrolita i infekcija.

Oštećenja koja nastaju u organima otpornijim na dejstvo zračenja posledica su uglavnom promena u njihovoj vaskularizaciji. Zračenje oštećuje endotelne ćelije krvnih sudova, povećava se propustljivost kapilara, u lumenu krvnih sudova nastaju opstrukcije, razvijaju se anoksija i hemorgije u radiorezistentnim tkivima i organima što se klinički manifestuje u vidu poremećaja njihove funkcije.

Cerebralni sindrom najverovatnije nastaje zbog oštećenja krvnih sudova mozga što je praćeno pojavom edema mozga, vaskulitisa i meningitisa. Uginuća životinja su posledica povećanog intrakranijalnog pritiska.

Težina kliničke slike i ishod ARS zavise od apsorbovane doze zračenja. U zavisnosti od apsorbovane doze zračenja bolest može biti blagog, umerenog, teškog i veoma teškog oblika.

Kod životinja ozračenih dozama od 1 Gy do 2 Gy razvija se **blagi oblik ARS**. *Prodromalna faza* traje nekoliko časova od ozračivanja i protiče bez kliničkih simptoma, u krvi se prvog dana javlja limfopenija. *Latentni period* traje od 2 do 7 dana i životinje deluju zdravo. Desetog dana od ozračivanja beleži se pad broja krvnih ćelija (tabela 10).

Faza izraženih kliničkih simptoma traje kratko, od 5 do 10 dana. Obično prolazi bez vidljivih kliničkih simptoma, sporadično se javljaju dijareja, gubitak apetita i prolazna depresija. Životinje se potpuno *oporave* 2 do 3 meseca posle ozračivanja. Tokom faze oporavka životinje koje nisu febrilne mogu se uputiti na klanje. Ne preporučuje se korišćenje ovih životinja za priplod.

Umereni oblik ARS nastaje ozračivanjem životinja dozama od 2 Gy do 4 Gy. *Prodromalna faza* nastaje dva sata nakon ozračivanja, traje 1 dan i manifestuje se poremećajem u ponašanju životinja i promenom trijasa. Životinje su prvo uplašene, da bi nakon nekoliko sati postale nevesele, pospane i usporeno reaguju na spoljašnje nadražaje. Ponekad se javlja hiperemija vidljivih sluzokoža, kod pasa i svinja povraćanje. Do kraja dana broj limfocita

opada za 30% do 40%. Simptomi polako nestaju i započinje *latentni period* bolesti koji traje od 10 do 15 dana. Životinje deluju zdravo, normalno uzimaju hranu i vodu. U krvi se javlja eritropenija i trombocitopenija, a od 5. dana i leukopenija (tabela 10).

Klinički simptomi se razvijaju postepeno: životinje se slabije kreću, gube apetit, telesna temperatura raste, salivacija je pojačana, na vidljivim sluzokožama nastaju tačkasta krvarenja, telesna težina opada za 5% do 10%, smanjuje se i laktacija. Životinje otežano dišu zbog pojave edema u predelu nazofarinksa i larinksa. Kod pasa i svinja javlja se povraćanje, kod nekih životinja i dijareja sa primesama krvi, dlaka se lako izvlači, kod ovaca se zapaža i epilacija. Bolest traje od 10 do 20 dana ili više. Oko 20% ozračenih jedinki ugine zbog oštećenja koštane srži i komplikacija u digestivnom i respiratornom traktu. Patomorfološkim pregledom uočavaju se opsežna krvarenja u koži, potkožnom tkivu i unutrašnjim organima. Patohistološki nalaz ukazuje na degenerativno distrofične promene i hiperemiju unutrašnjih organa.

Period oporavka traje od 4 do 5 meseci. Tokom faze oporavka životinje koje nisu febrilne i nemaju izražene kliničke simptome mogu se uputiti na klanje. Ne preporučuje se korišćenje ovih životinja za priplod, ali se mleko prebolelih krava može koristiti u ishrani ljudi. Kod prebolelih životinja u kasnijem periodu života moguća je pojava kasnih efekata zračenja u vidu radijacione katarakte.

Tabela 10. Smanjenje broja krvnih ćelija životinja nakon ozračivanja visokim dozama zračenja.²⁴

Vrsta krvnih ćelija	Blag oblik ARS (%)	Umeren oblik ARS (%)	Težak oblik ARS (%)	Veoma težak oblik ARS (%)
Leukociti	30–40	50–60	50–70	75–90
Limfociti	30–40	30–50	50–80	70–90
Trombocit	5–15	5–25	40–50	40–50
Eritrociti	bez promene	10–20	15–20	20–30
Prognoza	povoljna	Ugine do 20% ozračenih jedinki	Ugine do 60% ozračenih jedinki	Ugine (95–100) % ozračenih jedinki

Težak oblik ARS nastaje ozračivanjem životinja dozama od 4 Gy do 6 Gy. *Prodromalna faza* nastaje brzo, od 20 do 40 minuta od ozračivanja i traje 2 do 3 dana tokom kojih životinje povraćaju, uzimaju više vode, javlja se uznemirenost ili apatičnost, tremor mišića praćen mlataranjem repom, zenice su sužene, na vidljivim sluzokožama se pojavljuju tačkasta krvarenja, smanjeno je izlučivanje urina. Javlja se i dozno zavisna hiperglikemija u krvi koja traje od 2 do 3 nedelje (veća doza, veća hiperglikemija). Već prvog dana od ozračivanja se u krvi javlja kratkotrajna leukocitoza sa pomeranjem leukocitarne formule u levo, a zatim nastupa leukopenija. *Latentni period* traje 8 do 12 dana, životinje su prividno zdrave, ali gube na težini. U perifernoj krvi opada broj leukocita i eritrocita zbog hipoplastičnih promena koštane srži (tabela 10).

²⁴ Гудков, И.Н., Кудяшева, А.Г., Москалёв, А.А.: Радиобиология с основами радиоэкологии. СыктГУ, 2015.

Klinički simptomi bolesti se razvijaju naglo, bolest traje od 10 do 30 dana. Zapažaju se letargija, gubitak apetita, hipertermija i groznica, koža je suva, na vidljivim sluzokožama uočavaju se hemoragije, životinje otežano dišu zbog pojave edema nazofarinksa i larinksa, i pneumonije. Pojava proliva, u početku vodenastog, a kasnije sa primesama krvi, posledica je kataralno-hemoragičnih promena u želucu i crevima. Sporadično se javljaju krvarenja iz nosa i desni. Smanjenje broja trombocita u krvi predstavlja loš prognostički znak. Kod veoma teških oblika bolesti u krvi nema limfocita i trombocita što dovodi do opsežnih krvarenja u organizmu. Moguća su i iznenadna uginuća usled krvarenja u mozgu ili srcu. Uginu do 60% ozračenih životinja.

Period oporavka preživelih životinja traje od 1 do 3 godine. Neadekvatni životni uslovi mogu dovesti do pojave recidiva radijacione bolesti. Kod životinja tokom faze oporavka postoji rizik od pojave drugih zaraznih bolesti.

Veoma težak oblik ARS nastaje ozračivanjem životinja dozama većim od 6 Gy. U zavisnosti od apsorbirane doze zračenja manifestuje se kao *gastro-intestinalni oblik* (od 6 Gy do 50 Gy) i *cerebralni oblik* (> 50 Gy)²⁵. Simptomi bolesti se veoma brzo razvijaju i traju prosečno od 5 do 12 dana. Životinje ozračene dozama većim od 50 Gy uginu prvog do trećeg dana sa simptomima cerebralnog edema i encefalitisa. Uginu od 95% do 100% ozračenih jedinki.

Dijagnostika ARS se vrši na osnovu anamneze, podataka o radiološkom akcidentu, kliničkog i hematološkog pregleda. Bolest obično spontano prolazi kod životinja sa blagim simptomima ARS. Terapija životinja obolelih od umerenog oblika ARS je simptomatska i usmerena na dobro izbalansiranu ishranu, sprečavanje pojave sekundarnih bakterijskih infekcija i nadoknade vode i elektrolita. U lečenju se primenjuju i transfuzija krvi i transplantacija koštane srži. Životinje ozračene veoma visokim dozama se upućuju na prinudno klanje pre pojave kliničkih simptoma ARS. Etiologija i patogeneza ARS su isti kod svih vrsta životinja, klinička slika i simptomi bolesti se razlikuju i biće posebno opisani.

11.1.1. Akutni radijacioni sindrom goveda

Prodromalna faza se kod životinja ozračenih poluletalnom dozom (LD_{50/30}) javlja prvog dana posle ozračivanja. Zapažaju se: uznemirenost, tremor mišića i kratkotrajni porast telesne temperature za 1 °C. Početkom drugog dana broj limfocita opada, trećeg do četvrtog dana opada i broj leukocita.

Latentna faza traje od 7 do 10 dana. Životinje deluju zdravo, sporadično se javljaju prolivi, ponekad sa primesama krvi.

Klinički simptomi se javljaju između desetog i šesnaestog dana. Životinje leže, odbijaju hranu, žeđ je pojačana, javljaju se tačkasta krvarenja na vidljivim sluzokožama, edemi na ekstremitetima, proliv (ponekad sa primesama krvi), sporadično porast telesne temperature

²⁵ Neki autori kao veoma težak oblik ARS navode i kardiovaskularni oblik ili toksični oblik koji nastaje ozračivanjem dozama od 20 Gy do 80 Gy i manifestuje se sekundarnim oštećenjima centralnog nervnog sistema. U knjizi ovaj oblik nije posebno opisan zbog sličnosti sa cerebralnim oblikom ARS.

(40 °C do 41 °C), životinje imaju pogrbljen stav, zbog razvoja edema pluća, larinksa i farinksa životinje kašlju i otežano dišu. Ponekad se javlja i krvavi iscedak iz nosa. Epilacija nije izražena. U perifernoj krvi broj trombocita je smanjen, a od treće nedelje i broj eritrocita. Životinje ozračene dozom od 1,3 Gy do 1,6 Gy uginu nakon 20 dana. Ako životinje prežive, *oporavak* počinje posle 3 do 4 nedelje i traje mesecima.

Patomorfološki nalaz: hemoragična dijateza, pneumonija, atrofija limfnog tkiva i koštane srži, i ulceracije u digestivnom traktu.

11.1.2. Akutni radijacioni sindrom konja

Prodromalna faza kod životinja ozračenih LD_{50/30} nastaje odmah posle ozračivanja. Zapažaju se uznemirenost, osetljivost na spoljne nadražaje, potom i tremor mišića, poremećaj trijasa, kretanje u krug, gubitak apetita i dijareja. U kasnijem periodu ovi simptomi nestaju, životinje su apatične, leže, teško ustaju, temperatura blago raste. Drugog dana se kod mužjaka javlja edem prepucijuma i prolaps penisa, životinje odbijaju hranu i vodu, ponekad nastaju i vodenasti prolivi.

Latentni period počinje od 3 do 5 dana posle ozračivanja. Životinje su prividno zdrave, ali se u krvi beleži pad leukocita.

Klinički faza počinje od 7 do 9 dana od ozračivanja i traje od 10 do 25 dana. Životinje su jako uznemirene, udaraju prednjim i zadnjim nogama, osetljive su na dodir kože, javljaju se krvarenja na koži i vidljivim sluzokožama, promena trijasa, konvulzivni pokreti glave, repa i ekstremiteta, simptomi encefalomijelitisa, otežano disanje zbog plućnog edema, pojava ulkusa na koži i sluzokožama, proliv i krvarenja iz rektuma zbog ulcerozno-nekrotičinih promena u digestivnom traktu, edemi ekstremiteta i promene na očima u vidu konjunktivitisa i keratitisa. Epilacija nije izražena. U krvi je broj leukocita smanjen od 20% do 40%, trombocita od 20% do 30% i eritrocita od 60% do 70%. Uginuća mogu biti iznenadna zbog prestanka srčanog rada, ili im prethodi agonalno stanje praćeno ležanjem životinje, nekontrolisanim pokretima nogu i glave i snažnim tremorom. Kod preživelih životinja nastupa *period oporavka* koji traje mesecima.

11.1.3. Akutni radijacioni sindrom svinja

Prodromalna faza kod životinja ozračenih LD_{50/30} nastaje odmah posle ozračivanja. Zapažaju se povraćanje, gubitak apetita, povećana žeđ.

Latentni period traje od 2 do 3 dana, životinje deluju zdravo, u krvi se smanjuje broj leukocita za 50% i više.

Klinička faza počinje oko desetog dana. Simptomi su difuzna krvarenja na koži i sluzokožama, krvarenja iz usta, nosa, anusa, konvulzije, porast telesne temperature, edemi na ekstremitetima, slabost nogu, hramljanje, krvavi prolivi, otežano disanje i gubitak telesne težine. Životinje uginu od 18 do 25 dana sa simptomima hemoragične dijateze i opšte iscrpljenosti organizma, one koje prežive 45 dana obično se oporave. *Faza oporavka* traje od 3 do 4 meseca.

11.1.4. Akutni radijacioni sindrom pasa

Prodromalna faza, kod životinja ozračenih dozama od 2,5 Gy do 5,5 Gy, traje od 1 do 2 dana i jedini simptom je povraćanje. Tokom *latentnog perioda* životinje su prividno zdrave.

Klinički simptomi počinju devetog dana, javljaju se gubitak apetita, letargija, povraćanje, pojačana salivacija, proliv, dehidracija, pojava nekrotičnih polja u usnoj šupljini, tačkasta ili difuzna krvarenja na koži i sluzokožama, hemoragična dijareja i povišena telesna temperatura. Broj leukocita i eritrocita dostiže minimum 22 dana. Uginuća se javljaju posle 3 do 4 nedelje usled razvoja hematopoeznog oblika ARS.

11.2. Kasne promene

Kasne, hronične, promene kod životinja koje su prebolele ARS mogu nastati nekoliko meseci ili godina kasnije. U ove promene ubrajaju se skraćenje životnog veka, pojava malignih tumora, leukemija i katarakta.

12. RADIOPATOLOGIJA III

12.1. Radiološko trovanje ili akutni radijacioni sindrom izazvan internom kontaminacijom životinja

Unutrašnja kontaminacija životinja nastaje unošenjem radioaktivnih elemenata u organizam. U slučaju unosa visokih koncentracija radioaktivnih elemenata nastaju promene u organizmu koje po svojim kliničkim simptomima liče na ARS. Za razliku od spoljašnjeg ozračivanja, kada se apsorbovana doza zračenja može smanjiti udaljavanjem od izvora zračenja, unutrašnje ozračivanje traje dok se radioaktivni element ne eliminiše iz organizma ili se ne raspadne.

Radioaktivni elementi se u organizam mogu uneti ingestijom, inhalacijom ili transkutano. Ingestija kontaminirane hrane i vode je najznačajniji put kontaminacije životinja. Radijacione promene koje nastaju u organizmu su posledica radioaktivnog raspada unetih radionuklida, a stepen nastalih promena zavisi od njihove toksičnosti (pogledati poglavlje 7). Bolest može biti teškog, umerenog i blagog oblika. U kliničkoj slici razlikuju se tri perioda: latentni period, period izraženih kliničkih simptoma i period oporavka.

Težak oblik bolesti je opisan kod goveda u prvim danima posle nuklearne eksplozije. Simptomi bolesti se javljaju posle četvorodnevne ingestije hrane kontaminirane smešom fisionih produkata, mlađih od 10 dana²⁶, aktivnost od 1,2 GBq/kg do 1,4 GBq/kg. *Latentni period* traje od 3 do 5 dana tokom kojih se zapaža gubitak apetita, poremećaj pulsa, broj limfocita se ne menja. Dužina trajanja i težina kliničke slike zavisi od apsorbovane doze zračenja.

Klinički stadijum bolesti traje obično od 2 do 4 nedelje, ponekad i do dva meseca, simptomi su: gubitak apetita, povraćanje, proliv, ponekad anurija, gubitak telesne težine, opšta slabost organizma, telesna temperatura je normalna. Sa napredovanjem bolesti, pogoršava se zdravstveno stanje životinja. Opšta otpornost organizma se smanjuje zbog čega nastaju komplikacija u vidu rinitisa, bronhopneumonije i pneumonije. U krvi se javlja leukocitoza zbog povećanja broja neutrofila, broj limfocita, eritrocita i trombocita se obično ne menja, sedimentacija eritrocita može biti ubrzana. *Period oporavka* traje od 3 do 4 nedelje, ponekad i do 2,5 meseca. Većina životinja se uspešno oporavi.

Razlike između ARS izazvanog internom kontaminacijom radionuklidima i ARS koji nastaje usled spoljašnjeg ozračivanja se ogledaju u tome što u slučaju interne kontaminacije

²⁶ Kratkoživeći fisioni produkti.

izostaju: prodromalna faza, supresija funkcije koštane srži, krvarenja, epilacija i teška oštećenja digestivnog trakta (ulceracije i nekroze).

Kod **umerenog oblika** bolesti *latentni period* obično traje od 3 do 5 dana, a *klinički simptomi* oko dve nedelje. Simptomi obično nisu teški, apetit je blago smanjen, od prvog dana se javljaju povraćanje i proliv, a u krvi leukocitoza. Broj eritrocita, trombocita i sedimentacija se ne menjaju. *Oporavak* traje od 2 do 3 nedelje i obično sve životinje ozdrave.

U slučaju **blagog oblika** bolesti klinički simptomi obično izostaju.

Pojava ARS koji nastaje istovremenim spoljašnjim i unutrašnjim ozračivanjem životinje dovodi do nastanka tzv. *kombinovanih povreda* koje se manifestuju ranijom pojavom kliničkih simptoma bolesti, poremećajem funkcije digestivnog trakta, supresijom funkcije koštane srži, velikim gubitkom telesne težine, disfunkcijom rada štitne žlezde i sporim oporavkom životinja.

Dijagnoza se postavlja na osnovu podataka o radiološkom akcidentu, mestu boravka životinja u trenutku akcidenta, radiometrijske analiza hrane, sekreta i ekskreta, dozimetrijske kontrole životinja²⁷, kliničkih simptoma i hematoloških pregleda. Pojava teške limfocitopenije ili leukopenije u krvi ukazuje na razvoj ARS usled spoljašnjeg ozračivanja, dok nalaz neutrofilne leukocitoze sa normalnim broj limfocita ukazuje na razvoj ARS usled interne kontaminacije.

Terapija zavisi od vrste unetih radionuklida i načina njihovog unosa u organizam. U slučaju peroralne kontaminacije aplikuju se adsorbenti, laksativi, diuretici i drugi preparati koji treba da ubrzaju eliminaciju radionuklida iz organizma. Laksativi se daju četiri puta, prvi put pola sata do sat nakon davanja adsorbenata, a zatim posle 12 č, 24 č i 48 č. Životinjama se daje i smeša vodenog rastvora koštanog brašna ili barijum-sulfata sa dodatkom kalijum-jodida, i to u sledećim dozama: za velike životinje 500 g koštanog brašna ili barijum-sulfata sa dodatkom 2,5 g kalijum-jodida, i za male životinje 50 g koštanog brašna ili barijum-sulfata sa dodatkom 0,5 g kalijum-jodida.

U svim situacijama kada postoji radioaktivna kontaminacija hrane, životinjama se dodaju adsorbenti i radioprotektori koji treba da vežu radionuklide i omoguće njihovu eliminaciju iz organizma putem fecesa. Najčešće korišćeni adsorbenti su zeolit, kaolin i AFCF (amonijum-fero II-heksacijanoferat III). Od radioprotektora se koriste helatna jedinjenja, kao što su EDTA (etilen-di-amino-tetra-sirćetna kiselina) i DTPA (di-etilen-tri-amino-penta-sirćetna kiselina) koji su pokazali dobre rezultate u slučaju interne kontaminacije transuranskim elementima. Preparat EDTA se životinjama daje u koncentraciji od 10% i to od 100 ml do 200 ml velikim životinjama i od 10 ml do 20 ml malim životinjama tokom 3 do 4 dana.

Terapija u slučaju interne kontaminacije respiratornog trakta obuhvata davanje ekspetoransa i diuretika u kombinaciji sa terapijom koja se sprovodi u slučaju peroralne kontaminacije.

²⁷ Dozimetrijska kontrola životinja predstavlja monitoring živih životinja koji se obavlja u cilju utvrđivanja postojanja kontaminacije životinja. Izvodi se pomoću monitora zračenja sa GM brojačem ili drugih prenosivih detektora (NaI, Ge-Li).

12.2. Hronični radijacioni sindrom

Hronični radijacioni sindrom (u daljem tekstu HRS) ili hronična radijaciona bolest nastaje kao posledica dugotrajnog spoljašnjeg izlaganja malim dozama X i gama zračenja, izlaganja većim dozama zračenja u dužem vremenskom periodu sa međupauzama, dugotrajnim unošenjem radionuklida u organizam ili posle jednokratnog unošenja radionuklida koji imaju dugo fizičko i biološko vreme poluraspada. Kod ljudi se HRS razvija nakon izlaganja celog tela dozama zračenja (od 0,7 do 1,0) Gy/godišnje ili dozama zračenja većim od 2 Gy do 3 Gy tokom dve do tri godine.

Termin „hronično“ u nazivu bolesti odnosi se na dugotrajno izlaganje zračenju, a ne na dužinu trajanja bolesti, jer i ARS izazvan subletalnim dozama zračenja može imati hronični tok bolesti.

Osnovne karakteristike HRS su:

1. za kritična tkiva i organe postoji „prag doza“,
2. dužina latentnog perioda je obrnuto proporcionalna dužini izlaganja kritičnih tkiva i organa,
3. klinički simptomi su nespecifični i najčešće su posledica hematoloških i neuroloških oštećenja,
4. brzina nastanka HRS i dužina trajanja oporavka zavise od doze i brzine doze,
5. oštećenja tkiva i organa se postepeno povećavaju i direktno su proporcionalna apsorbovanoj dozi zračenja,
6. tokom perioda trajanja bolesti, u organizmu se istovremeno dešavaju i oštećenja i reparativni i adaptivni odgovori organizma,
7. u blažim slučajevima bolesti, prestanak ozračivanja ili smanjenje doze ispod „praga doze“ dovodi do spontanog oporavka tkiva i organa.

Adaptivni odgovor predstavlja modifikovanu reakciju ćelija izloženih malim dozama zračenja (<0,5 Gy), koja podrazumeva povećanja otpornosti ćelija na zračenje u slučaju izlaganja većim dozama zračenja. Zahvaljujući adaptivnom odgovoru ćelija, postoji verovatnoća da će učestalost pojave hromozomskih aberacija, mutacija i ćelijska smrt biti manje izražena u slučaju narednog ozračivanja ćelija visokim dozama zračenja²⁸.

HRS se manifestuje u vidu funkcionalnih poremećaja organizma koji dovode do pada proizvodnih sposobnosti životinja. Ovi poremećaji su posledica distrofičnih promena u organima, inhibicije hematopoeze, smanjenja regenerativne sposobnosti organizma i pada imuniteta. Kod jedinki koje prezdrave bolest u daljem periodu života mogu se razviti maligni tumori i leukemija. Klinička slika životinja obolelih od HRS može biti blaga, umerena i teška.

²⁸ Ova oblast još nije dovoljno istražena zbog čega se adaptivni odgovori ćelija na zračenje ne razmatraju prilikom donošenja zakonskih regulativa o zaštiti stanovništva od jonizujućih zračenja.

Kod **blagog oblika** HRS (I stepen bolesti) nastaju sledeće promene: broj krvnih ćelija je blago smanjen i održava se na donjoj fiziološkoj granici, javlja se trombocitopenija, sporadično i fluktuacije krvnog pritiska, reverzibilne promene u digestivnom i kardiovaskularnom sistemu, i ubrzano starenje organizma. U koštanoj srži nema značajnih histoloških promena, ponekad nastaje umerena hiperplazija koštane srži.

Umeren oblik HRS (II stepen bolesti) prate sledeći simptomi: reverzibilna hipoplazija koštane srži praćena smanjenjem broja limfocita, neutrofila, leukocita i trombocita, nizak krvni pritisak, poremećaj funkcije digestivnog trakta praćen pojavom proliva i smanjenjem telesne težine, poremećaj funkcije endokrinih žlezda i pojava hipoproteinemije i hipoglikemije. Zbog smanjene otpornosti organizma moguće su pojave zaraznih bolesti i uginuća životinja.

Težak oblik HRS (III stepen bolesti) karakteriše nastanak teških ireverzibilnih promena u hematopoeznim organima, digestivnom traktu, nervnom sistemu i distrofične promene u drugim tkivima i organima. Broj krvnih ćelija opada, razvija se anemija i težak poremećaj imuniteta koji može uticati na razvoj septičnog stanja. Kod životinja se zapaža i epilacija, poremećaj srčane aktivnosti, disfunkcija endokrinih žlezda, manifestuju se svi simptomi karakteristični za ARS. Prognoza je nepovoljna.

Oporavak životinja sa blagim i umerenim simptomima HRS počinje kada ozračivanje prestane ili se absorbovana doza zračenja značajno smanji, može trajati danima, nedeljama i mesecima.

Interna kontaminacija životinja radionuklidima dovodi do pojave HRS koji nastaje zbog lokalnog ozračivanja tkiva i organa, a kao posledica radioaktivnog raspada unetih radionuklida.

12.3. Radijacione opekotine

Radijacione opekotine nastaju ozračivanjem kože X i gama zracima (radijacioni dermatitis) i beta česticama (beta opekotine). Beta čestice imaju kratak domet (prodiru u kožu do 1 cm) i u slučaju spoljašnjeg ozračivanja izazivaju promene samo na koži, dok fotoni X i gama zračenja imaju visoku prodornost i dovode do ozračivanja i drugih tkiva i organa²⁹.

²⁹ Radijacione opekotine su prvi put opisane 1945. godine kod krava koje su boravile u području gde je izvršena prizemna atomska proba (SAD, Nevada). Zdravstveno stanje životinja praćeno je posmatranjem 11 krava tokom 15 godina. Jedna krava je živela 20 godina. Tokom pet meseci od nuklearne eksplozije nisu uočene promene kod ozračenih životinja, izuzetak su bile starije jединke kod kojih se javila blaga leukopenija. U kasnijem periodu života kod ovih jediniki su se razvile promene na koži u vidu: depigmentacije, atrofije lojnih žlezda praćene pojavom suve kože, alopecijom, gubitkom elastičnosti kože i hiperkeratozom u vidu ravnih ili bradavičastih promena visine od 3 cm do 4 cm iznad kože. Tokom reproduktivnog perioda krave su svake godine na svet donosile zdravu telad. Slične promene na koži opisane su i kod životinja sa kratkom i tankom dlakom, dok su promene kod ovaca slabo izražene zbog gustog krzna.

12.3.1 Beta opekotine

Beta opekotine nastaju ozračivanjem kože beta česticama. Kontaminacija životinja beta emiterima može biti direktna i indirektna. **Direktna kontaminacija** nastaje taloženjem radioaktivnih padavina, najčešće na greben, leđa, sapi. **Indirektna kontaminacija** nastaje kretanjem životinja preko kontaminiranog zemljišta, i u tom slučaju se kontaminiraju distalni delovi ekstremiteta. Klinička slika beta opekotina je slična onoj koja se razvija kod termičkih opekotina. Razlika se ogleda u tome što se kod termičkih opekotina promene uočavaju neposredno posle dejstva toplote, dok kod beta opekotina postoji latentni (skriveni) period koji može trajati od nekoliko dana do nekoliko nedelja.

Zbog svoje anatomske i fiziološke građe i postojanja gustog dlačnog pokrivača, koža životinja je dobro zaštićena od radioaktivne kontaminacije. U slučaju kontaminacije tela životinja beta emiterima dolazi do njihovog nakupljanja u krznu, porama i naborima kože gde ih zadržava kožna mast. Kod životinja sa kratkom dlakom ugroženi su: glava, leđa, vime, zglobovi, akropodijum i intradigitalna regija.

U razvoju bolesti razlikuju se četiri faze (stadijuma) čiji intezitet ispoljavanja zavisi od apsorbovane doze zračenja:

1. **Primarni stadijum**, nastaje nekoliko sati ili dana posle ozračivanja kože i traje dva do tri dana. Na koži se zapažaju: hiperemija, edem, koža je bolna, ponekad se javlja i svrab pa životinje češu ili grizu promenjena mesta.
2. **Latentni stadijum**, traje od nekoliko dana do dve nedelje tokom kojih se na koži javlja eritem.
3. **Stadijum akutnog radiodermatitisa**, manifestuje se promenama na koži čiji intezitet zavisi od apsorbovane doze zračenje i može biti:
 - *Lakog stepena*, nastaje ozračivanjem dozama do 5 Gy, na koži se primećuju blag eritem, umerena epilacija i perutanje kože.
 - *Srednjeg stepena*, nastaje ozračivanjem dozama od 5 Gy do 10 Gy, bolest traje od 3 do 4 nedelje. Koža je hiperemična i edematozna, javljaju se bol i površinske rane na koži.
 - *Teškog stepena*, nastaje ozračivanjem dozama od 10 Gy do 30 Gy. Klinička slika se razvija brzo posle ozračivanja (od 5 do 8 dana) i manifestuje se pojavom izražene hiperemije, edema, mehurića (bula, plikova) sličnih onima koji nastaju kod termičkih opekotina, ubrzo nastaju i erozije i ulceracije na koži. Telesna temperatura je povišena, javlja se otok regionalnih limfnih čvorova, životinje gube apetit, promene u perifernoj krvi su slične promenama kod ARS.
 - *Vrlo teškog stepena*, nastaje ozračivanjem dozama većim od 30 Gy. Latentni period skoro da izostaje i vrlo brzo se javlja poremećaj opšteg stanja praćen gnojno-nekrotičnim ulceracijama na koži. Stopa mortaliteta je visoka.
4. **Stadijum oporavka** može trajati od jednog do dva meseca kod srednjeg stepena bolesti, ili tri do četiri meseca kod teškog oblika bolesti. Kod oporavljenih životinja dugo se zadržava atrofija kože, ulceracije sporo zarastaju, moguća je i pojava malignih transformacija na koži tokom života.

Dijagnoza beta opekotina se postavlja na osnovu anamneze, kliničke slike i radiometrijske kontrole. Lečenje velikih životinja sa beta opekotinama nije ekonomski isplativo. Kod malih životinja prvo se vrši dekontaminacija kože i krzna, terapija je simptomatska. Prognoza zavisi od veličine promena na koži. Ako je zahvaćeno više od 5% kože prognoza je nepovoljna, kao i u slučaju teških i vrlo teških beta opekotina.

12.4. Udružene radijacione povrede

Kod životinja koje se nalaze u reonu nuklearne eksplozije nastaju udružene radijacione povrede (u daljem tekstu URP) kao posledica radioaktivnog, udarnog i termičkog dejstva atomske bombe. Takođe, eksplozije u nuklearnim objektima mogu izazvati ovu vrstu povreda kod životinja koje se nalaze u neposrednoj okolini.

Kod povređenih životinja dolazi do kombinacije mehaničkih, termičkih i radijacionih oštećenja. URP obično dovode do ozbiljnog narušavanja zdravstvenog stanja životinja, i klinički se manifestuje u vidu:

- nespecifičnosti primarne reakcije, koja se ogleda u tome što mehaničke i termičke povreda mogu prikriti inicijalne simptome ARS,
- skraćanjem latentnog perioda ARS,
- klinički simptomi ARS su jače izraženi, rane teže zarastaju i
- češće pojave šoka, krvarenja i komplikacija.

Dijagnoza se postavlja na osnovu anamneze, kliničke slike, hematoloških parametara i radiometrijske kontrole. Terapija je složena i obuhvata lečenje ARS i drugih mehaničkih i termičkih povreda. Obuhvata: anti-šok terapiju, analgeziju životinja, normalizaciju srčanih aktivnosti, obradu mehaničkih povreda i opekotina, sprečavanje sekundarnih infekcija. Prognoza je nepovoljna kod životinja sa teškim povredama.

13. ZAŠTITA ŽIVOTINJA I STOČARSKE PROIZVODNJE U VANREDNOJ RADIOLOŠKOJ SITUACIJI

Period posle radiološkog akcidenta može se podeliti u tri faze: ranu, srednju i kasnu. *Rana faza* (prva faza) radioaktivne kontaminacije obuhvata period od trenutka nuklearnog akcidenta pa do taloženja prvih radioaktivnih padavina. Dužina trajanja ove faze zavisi od udaljenosti od mesta akcidenta i može biti od pola časa do nekoliko dana. U cilju pravovremenog delovanja u slučaju radijacionog akcidenta osnovana je evropska mreža za razmenu podataka EURDEP (eng. *European Radiological Data Exchange Platform*) koja obezbeđuje kontinuirano merenje radioaktivnosti na oko 5500 mernih stanica u Evropi. Podaci merenja su dostupni na sajtu Direktorata za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije.

Srednja faza radioaktivne kontaminacije počinje nakon prolaska radioaktivnog oblaka i akutnog taloženja radioaktivnih čestica, i traje nekoliko nedelja ili meseci, odnosno dok se ne raspadnu kratkoživeći fisioni radionuklidi. *Kasna faza* radioaktivne kontaminacije ili faza oporavka, počinje oko godinu dana nakon nuklearnog akcidenta. Tokom ove faze u životnoj sredini su prisutni dugoživeći fisioni produkti.

13.1. Preventivne mere zaštite

U prvoj fazi radioaktivne kontaminacije životne sredine, a na osnovu dostupnih informacija o prirodi i obimu akcidenta, sprovode se preventivne mere zaštite u cilju sprečavanja kontaminacije životinja putem direktne depozicije radioaktivnih padavina. Preventivne mere zaštite životinja obuhvataju:

1. *Sklanjanje životinja sa otvorenih prostora* (pašnjaci, ispusti). Ova mera je najefikasnija ako se sprovede pre taloženja radioaktivnih padavina. Životinje se smeštaju u štale, zemunice, podrumne, pećine ili druge zatvorene prostorije.
2. *Hermetizacija stajskih objekata* podrazumeva zatvaranje vrata, prozora i drugih otvora u kojima borave životinje, da bi se sprečio prodor kontaminiranog vazduha. Kao materijali za hermetizaciju se mogu koristiti plastične folije, drveni paneli, impregnirano platno, terpapier.
3. *Zaštita izvorišta vode* za napajanje životinja. Zaštita otvorenih bunara od radioaktivne kontaminacije vrši se postavljanjem nadstrešnice i poklopca, koji treba da dobro naleže na rubove bunara. Mogu se koristiti i folije od PVC-a, ili nekog drugog nepromočivog materijala, koji se povezuju konopcem da ih vetar ne bi odneo. Ukoliko prostor oko bunara nije ozidan ili popločan, postavlja se sloj gline debljine 20 cm, širine od

2 m do 3 m, sa blagim padom da bi se slivne vode odvodile što dalje od bunara. Kad god je to moguće za napajanje životinja treba da se koristi voda iz vodovodske mreže, ili drugih zatvorenih sistema, koja se redovno kontroliše.

4. **Zaštita hrane za životinje.** Da bi se sprečila radioaktivna kontaminacija hrane za životinje (livadske trave, lucerka, seno, itd.) putem depozicije radionuklida, hranu treba skupiti u stogove i kamare i prekriti ih folijama od PVC-a ili nekog drugog nepromočivog materijala. Najbolji način za zaštitu hrane za životinje je smeštaj u silose, skladišta ili u prirodne zaklone (pećine, lagumi, rudarska okna). Skladišta i druge prostorije za čuvanje hrane treba hermetički zatvoriti (vrata, prozore, ventilacione otvore).

13.2. Mere zaštite u srednjoj i kasnoj fazi radioaktivne kontaminacije životne sredine

U prva tri meseca posle nuklearnog akcidenta i taloženja radioaktivnih padavina, najveću opasnost za ljude i životinje predstavljaju izotopi joda, od kojih je najznačajniji ^{131}I ($T_{1/2}=8$ dana), pa zato ovaj period nosi naziv „*jodni period*“. Tokom jednog perioda, ljudima i životinjama treba obezbediti dodatni unos stabilnog joda da bi se smanjila resorpcija i akumulacija radiojoda u štitnoj žlezdi. Po isteku tri meseca, radiojod se skoro u potpunosti raspada i nestaje iz životne sredine, ali su srednježiveći i dugoživeći radioizotopi i dalje prisutni.

U početnom periodu srednje faze radioaktivne kontaminacije životne sredine, životinje treba i dalje držati u zatvorenim objektima, a posebno treba voditi računa o bezbednom uklanjanju fecesa iz objekata, kao i o zaštiti ljudi koji dolaze u kontakt sa životinjama i ishrani životinja. Mere zaštite koje se sprovode treba da omoguće sprečavanje ili smanjenje migracije radiocezijuma i radiostroncijuma kroz lanac hrane. Radiometrijskim merenjima određuje se sastav radioaktivnih padavina (identifikacija radionuklida), stepen kontaminacije hrane i vode za napajanje životinja i zemljišta koje se koristi za ispašu životinja.

Da bi se predvideo stepen radioaktivne kontaminacije namirnica životinjskog porekla koriste se koeficijenti prelaza (K_p) koji su određeni eksperimentalnim putem. Koeficijent prelaza se definiše kao udeo ukupnog dnevnog unosa radionuklida koji pređe u 1 kg animalnog proizvoda, u uslovima ravnotežnog dnevnog unošenja radionuklida:

$$K_p \left(\frac{\text{dan}}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{aktivnost radionuklida u proizvodu animalnog porekla (Bq/kg svežeg uzorka)}}{\text{dnevni unos hraniva (kg/d} \cdot \text{aktivnost radionuklida u hranivu (Bq/kg))}}$$

Mere zaštite koje se sprovode u srednjoj fazi kontaminacije životne sredine su:

1. **Dozimetrijska kontrola i klinički pregled životinja** (monitoring živih životinja) sa radioaktivnog područja. Dozimetrijska kontrola se izvodi pomoću monitora zračenja sa GM brojačem ili drugih prenosivih detektora (NaI, Ge-Li) kako bi se utvrdilo da li je došlo do spoljašnje i/ili unutrašnje radioaktivne kontaminacije životinja. Obavlja se na

svakoj životinji pojedinačno tako što se sondom sa GM brojačem lagano prelazi na visini od 5 cm iznad površine dlačnog pokrivača, naročito preko gornjih delova tela – glave, vrata, leđa i sapi. Životinje se označavaju kao radioaktivno kontaminirane kada je odbroj na površini tela od 3 do 5 puta veći u odnosu na gama fon pre nastalog vanrednog događaja. Radioaktivno kontaminirane životinje se izdvajaju i usmeravaju ka punktu za dekontaminaciju životinja. Radiometrijska kontrola na unutrašnju radioaktivnu kontaminaciju se obavlja merenjem aktivnosti sekreta (mleko) i ekskreta (urin, feces). Uzeti uzorci se stavljaju u aluminijumsku planšetu ili neku drugu plitku posudicu (na primer, poklopac od tegle), prinosi se sonda sa GM brojačem na visini od 2 cm do 3 cm od površine uzorka i vrši se merenje aktivnosti. Ako se ustanovi da je odbroj više od pet puta veći u odnosu na gama fon pre nastalog vanrednog događaja, znači da je došlo do unutrašnje kontaminacije životinja. Uzorci sekreta i ekskreta u kojima se ustanovi povišena aktivnost se šalju na dalja ispitivanja u cilju identifikacije i određivanja sadržaja prisutnih radionuklida.

Na osnovu iskustva veterinarara stečenog posle Černobiljskog akcidenta razvijeni su protokoli za brzu procenu zdravstvenog stanja kod velikih životinja. Klinički pregled započinje merenjem telesne temperature, hematološkim pregledom i opštim kliničkim pregledom. Iz stada se izdvajaju životinje kod kojih se dijagnostikuju respiratorni poremećaji u vidu kratkog daha i kašlja, rektalna temperatura niža od 37 °C, broj leukocita u venskoj krvi manji od $5 \cdot 10^3 / \text{mm}^3$, debljina kožnog nabora u predelu vrata veća od 12 mm i dlaka koja se lako kovrdža³⁰.

Kod ovih životinja određuje se nivo tireoidnih hormona i antitireodinih antitela u krvi. Stanje respiratornog trakta procenjuje se pomoću testa funkcionalnog opterećenja. Životinje se teraju na trčanje u trajanju do 3 minuta, a zatim se izdvajaju životinje kod kojih se uoči otežano disanje i kašalj. Da bi se utvrdilo da li postoje promene na štitnoj žlezdi i srcu životinje se upućuju na kontrolno klanje (oko 5% od ukupnog broja životinja sa promenama). Smatra se da su životinje ozračene ako je masa štitne žlezde manja od 4 g i ako se uoče degenerativne promene na perikardu ili perikardijalnom masnom tkivu. Sve jedinice kod kojih se dijagnostikuje povećanje titra antitireodinih antitela i smanjenje koncentracije tiroksina u krvi šalju se na prinudno klanje. Životinje bez navedenih promena treba držati pod stalnim veterinarski nadzorom koji uključuje sprovođenje svih mera zaštite od radioaktivne kontaminacije. Čim se za to steknu uslovi, ove životinje treba poslati na prinudno klanje, a priplodna grla zameniti životinjama koje nisu bile izložene radiojodu.

Životinje za koje se utvrdi da su bile izložene spoljašnjem zračenju, bez prisustva interne radioaktivne kontaminacije, šalju se u latentnom periodu ARS (pre pojave kliničke faze bolesti) na prinudno klanje koje se obavlja po pravilima klanja za zdrave životinje. Životinje se teškim kliničkim simptomima ARS se neškodljivo uklanjaju.

³⁰ Белов, А.Д., Киршин, В. А., Лысенко, Н. П., Пак, В. В., Рогожина, Л. В.. Радиобиология. Москва, „КОЛОС“, 1999.

2. *Organizacija rada i postupak klanja kontaminiranih životinja.* Na klanicama se prvo kolju zdrave životinje, a zatim životinje kod kojih postoji interna kontaminacija radionuklidima. Da bi se sprečila radioaktivna kontaminacija mesa sadržajem iz digestivnog trakta obavezno se pre vađenja iznutrica postavljaju ligature na početku i kraju creva. Obradene polutke se kontrolišu monitorom zračenja da bi se utvrdilo da li postoji radioaktivna kontaminacija mesa. Ako je odbroj na površini polutke od 2 do 3 puta veći od gama fona pre nastalog vanrednog događaja polutke se izdvajaju, uzimaju se uzorci od svake polutke (minimum 100 g) i šalju na dodatna radiometrijska ispitivanja (gama spektrometrija) kojima se određuju vrsta i sadržaj radionuklida.

Posle završetka klanja radioaktivno kontaminiranih životinja, kompletan pribor za klanje i prostorije se moraju dekontaminirati pranjem uz pomoć vode i sapuna ili deterdženata. Radnici koji rade na poslovima klanja i dekontaminacije opreme i prostorija moraju imati odgovarajuću zaštitnu opremu kao i štitnike za lice radi zaštite od prskanja vode i kontaminiranog materijala. Tokom celog procesa klanja i dekontaminacije, lice zaduženo za dozimetrijsku kontrolu vrši nadzor nad osobljem. Pri skidanju zaštitne odeće i obuće treba voditi računa da ona ne dođe u kontakt sa kožom i garderobom radnika.

Ukoliko se prilikom klanja u mesu i organima utvrde makroskopske promene, uzimaju se uzorci mesa i šalju na radiometrijsku i bakteriološku analizu. U zavisnosti od dobijenog nalaza, meso se može obraditi nekim od tehnoloških procesa prerade kojima se smanjuje sadržaj radionuklida u mesu. U slučaju prisustva dugoživećih radioaktivnih elemenata iznad dozvoljenog nivoa, meso se salamuri i kuva pod pritiskom. Ukoliko su u mesu prisutni kratkoživeći radionuklidi, prave se dugotrajni suvomesnati proizvodi, a meso se može i čuvati u hladnjačama dok se sadržaj kratkoživećih radionuklida ne smanji. Pre puštanja na tržište obavezna je radiometrijska kontrola. Ako je u mesu ili mesnim proizvodima sadržaj radionuklida u okviru dozvoljenih limita proizvodi se puštaju na tržište, u suprotnom se neškodljivo uklanjaju.

3. *Dekontaminacija životinja* podrazumeva uklanjanje radioaktivnih elemenata sa tela životinja. Sve postupke dekontaminacije obavljaju obučena lica. Tokom rada je obavezno korišćenje zaštitne opreme (odeća, obuća, rukavice, kape, viziri), i povremena radiometrijska kontrola i dekontaminaciji opreme i pribora. Dekontaminacija životinja se obavlja u stanicama za dekontaminaciju stoke (SDS) koje se formiraju van naseljenih mesta, na zemljištu koje ima veliku propustljivost i filtracionu sposobnost (najbolja su peskovita zemljišta), i u čijoj neposrednoj blizini se nalaze izvori vode (reke, jezera, bunari i dr.). U zavisnosti od godišnjeg doba i snabdevenosti vodom, postupak dekontaminacije može da se izvrši: vlažnim, suvim i kombinovanim načinom. Ovce se pre dekontaminacije obavezno šalju na šišanje.

a) **Vlažni način** radioaktivne dekontaminacije životinja predstavlja polivanje, pranje životinja mlazom vode pod pritiskom, kupanje ili tuširanje, uz korišćenje deterdženata ili sapuna (3% do 5% rastvor sapuna). Primenjuje se u toplim mesecima kada je spoljašnja temperatura vazduha iznad 10 °C. Kad god je to

moguće, životinje treba pustiti da se kupaju u tekućim (reke) ili stajaćim (jezera) vodama.

b) **Suvi postupak** radioaktivne dekontaminacije se primenjuje u hladnim periodima i u slučaju nedostatka vode. Radioaktivna prašina se sa tela životinja prvo uklanja primenom usisivača za prašinu i korišćenjem četki sa dugim drškama (80 cm do 100 cm). Zatim se životinje istrljaju vlažnim krpama (može i snegom tokom zimskih meseci), i na kraju se osuše suvim krpama. Krpe se ne smeju potapati u kofe sa vodom, već se voda naliva na krpe i one se ispiraju i cede nekoliko puta. Oči, nozdrve i usna duplja mogu da se isperu 2% rastvorom sode bikarbone ili 0,2% rastvorom hipermangana. Ovce se umesto suve dekontaminacije mogu samo ošišati.

c) **Kombinovani postupak** dekontaminacije se zasniva na delimičnom korišćenju vlažnog i suvog načina dekontaminacije. Suvim postupkom se očiste glava, vrat i trup, a ekstremiteti se polivaju vodom.

Najbolji postupak dekontaminacije se postiže korišćenjem visoko ekspanzivne pene. Telo životinja se namaže penom, ostavi 2 minuta do 3 minuta, posle čega se očisti četkom sa dugačkom drškom i ispere vodom.

4. **Korekcija ishrane domaćih životinja i dodavanje adsorbenata.** Korekcija obroka za životinje podrazumeva zamenu visoko kontaminiranih hraniva nekontaminiranim i manje kontaminiranim hranivima. Na primer, visoko kontaminirana hrana, kao što je trava, može se zameniti konzervisanim (silaža kukuruza) i koncentrovanih (suncokretova sačma, zrno kukuruza) hranivima iz prethodne godine koja su bila zaštićena od radioaktivne kontaminacije.

Adsorbenti su sredstva koja se životinjama daju peroralnim putem (hranom, vodom, bolusima i dr.) u cilju vezivanja radionuklida u digestivnom traktu, čime se omogućava njihova eliminacija iz organizma fecesom i sprečava akumulacija u mesu, mleku i jajima. Kao adsorbenti radiocezijuma najčešće se koriste glineni minerali, kao što su bentonit, zeolit i vermikulit, u količinama od (0,5 do 2) g/kg telesne mase, i preparat pod nazivom AFCF ili Gizeova so (amonijum-gvožđe (III) heksacijanoferat (II)) u dozi od 1 g do 3 g dnevno po životinji.

14. ZAKONSKA REGULATIVA I

Zaštita od jonizujućih zračenja obuhvata primenu različitih tehničko-tehnoloških, građevinskih i higijenskih mera, ali i zakonskih propisa čime se obezbeđuje zaštita profesionalno izloženih lica, stanovništva i životne sredine od štetnog uticaja jonizujućeg zračenja. Osnovni cilj u zaštiti ljudi od ozračivanja je ograničavanje verovatnoće nastanka stohastičkih efekata zračenja.

Radijacioni rizik je verovatnoća da će zračenje izazvati neki štetni efekat u ozračenom organizmu. Da bi se sprečila pojava stohastičkih efekata zračenja, kancera i leukemija, u zaštiti od zračenja primenjuje se **linerni model bez praga** (eng. *LNT, Linear No-Threshold*) prema kome ne postoji bezbedna doza zračenja, odnosno svaka, pa i niska doza zračenja, može izazvati štetne efekte u organizmu.

Koncept za zaštitu ljudi od zračenja zasnovan je na primeni tri načela: načela **opravdanosti, optimizacije i ograničenja** upotrebe izvora jonizujućih zračenja.

1. **Opravdanost** je prvi princip u zaštiti od zračenja koji podrazumeva da je izlaganje zračenju opravdano isključivo kada je korist od ozračivanja veća od štetnih efekata koje zračenje može izazvati.
2. **Optimizacija** podrazumeva primenu mera zaštite od jonizujućih zračenja kojima se doza zračenja smanjuje na najniži mogući nivo. Opšti, sveobuhvatni koncept zaštite od zračenja, tzv. ALARA koncept (eng. *As Low As Reasonably Achievable*) podrazumeva smanjenje doze zračenja toliko nisko koliko je to razumno moguće postići.
3. **Ograničenje** izlaganja zračenju podrazumeva primenu zakonskih propisa kojima su propisane granice izlaganja profesionalno izloženih lica i stanovništva jonizujućem zračenju.

Živa bića su svakodnevno izložena dejstvu zračenja koje potiče iz životne sredine usled zaostale radioaktivne kontaminacije iz prethodnih perioda, povećane prirodne radioaktivnosti u životnoj sredini i korišćenja proizvoda široke potrošnje koji sadrže prirodne izvore zračenja, i to se naziva **postojeća situacija** ozračivanja.

Pored toga, ozračivanje živih bića može biti rezultat neke planirane radijacione aktivnosti ili posledica nekog radiološkog akcidenta (vanredna situacija). Situacija **planiranog izlaganja** zračenju nastaje kao rezultat unapred predviđenih ljudskih aktivnosti koje mogu dovesti do dodatnog izlaganja ljudi i životne sredine ili planiranim korišćenjem izvora zračenja. U slučaju planiranog izlaganja, doza zračenja koju prime profesionalno izložena lica i stanovništvo ne sme biti iznad propisanih nivoa.

Vanredno izlaganje zračenju nastaje u situacijama nuklearnih i drugih radioloških akcidenata praćenih povišenjem ambijentalne doze zračenja i radioaktivnom kontaminacijom životne sredine.

14.1. Zaštita ljudi i životinja u situacijama postojećeg i planiranog izlaganja zračenju

Jonizujućem zračenju mogu biti izloženi: profesionalno izložena lica, stanovništvo i pacijenti³¹. Profesionalno izložena lica su osobe koje rade sa izvorima jonizujućih zračenja, i lica koja se tokom obuke za rad ili školovanja nalaze u polju jonizujućeg zračenja.

Granica efektivne doze za **profesionalno izložena lica** je 100 mSv za pet uzastopnih godina, prosečno 20 mSv godišnje, uz dodatno ograničenje da ni u jednoj godini efektivna doza ne sme da pređe vrednost od 50 mSv.

Granice ekvivalentne doze za profesionalno izložena lica su: za očno sočivo 150 mSv/god, za kožu 500 mSv/god i za delove ekstremiteta (šake, podlaktice, stopala i gležnjeve) 500 mSv/god.

Prema uslovima rada i nivoima izlaganja jonizujućim zračenjima, profesionalno izložena lica se klasifikuju u dve kategorije:

- kategorija A: lica koja prime efektivnu dozu veću od 6 mSv godišnje ili ekvivalentnu dozu veću od 3/10 propisanih granica doze za pojedine organe, i
- kategorija B: lica koja prime efektivnu dozu manju od 6 mSv godišnje.

Profesionalno izložena lica iz kategorije A su u obavezi da svoje lične pasivne dozimetre šalju na očitavanje doze najmanje jednom mesečno, a radnici iz kategorije B najmanje jednom u tri meseca.

Izlaganje **stanovništva** zračenju procenjuje se na osnovu rezultata dozimetrijskih i radiometrijskih merenja i određivanjem ekvivalentne i efektivne doze zračenja. Granica efektivne doze zračenja koju stanovništvo prima iz spoljašnjih i unutrašnjih izvora zračenja (ingestija i inhalacija radionuklida) iznosi 1 mSv godišnje.

Granice ekvivalentne doze za stanovništvo su: 15 mSv/god. za očno sočivo, 50 mSv/god. za kožu i 1 mSv za nerođeno dete od trenutka dijagnostike graviditeta do rođenja deteta.

Da bi se ograničilo ozračivanje ljudi i životinja koje potiče od radionuklida koji se u organizam unose putem vode (tabela 11) i hrane (tabela 12), zakonom je propisan njihov maksimalno dozvoljene sadržaj u vodi i hrani. Granična efektivna doza zračenja koju ljudi i životinje primaju usled ingestije radionuklida putem hrane i vode je 0,1 mSv/godišnje.

³¹„Sl. glasnik RS“, br. 86/2011 i 50/2018. Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima, i „Službeni glasnik RS“, 36/2018. Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet.

Tabela 11. Izvedene granice (IK)³² pojedinačnih radionuklida u vodi za piće.

Radionuklid	Izvedena koncentracija (Bq/l)
prirodni radionuklidi	
²³⁸ U*	3,0
²³⁴ U*	2,8
²²⁶ Ra	0,5
²²⁸ Ra	0,2
²¹⁰ Pb	0,2
²¹⁰ Po	0,1
proizvedeni radionuklidi	
¹⁴ C	240
⁹⁰ Sr	4,9
²³⁹ Pu/ ²⁴⁰ Pu	0,6
²⁴¹ Am	0,7
⁶⁰ Co	40
¹³⁴ Cs	7,2
¹³⁷ Cs	11
¹³¹ I	6,2

*Prilikom određivanja dozvoljenih nivoa sadržaja radionuklida u vodi razmatrana je samo radiološka toksičnost izotopa uranijuma, njegova hemijska toksičnost nije razmatrana.

Tabela 12. Granice sadržaja ¹³⁷Cs u hrani.

Vrsta namirnice	¹³⁷ Cs (Bq/kg; Bq/l)
Mleko i mlečni proizvodi, hrana za odojčad, povrće, voće, žitarice, meso, jaja, mast, ulje, šećer, slatkiši, alkoholna i bezalkoholna pića	15
Mleko u prahu, bobičasto divlje voće (borovnica, brusnica, kupine, jagode, maline, ribizle, ogrozd), divljač, riba, morski plodovi, pečurke (svežim i proizvodima od pečuraka), lekovito bilje, čajevi i kafa	150
Suve pečurke, arome, začini i ostale namirnice koje se koriste manje od 2 kg godišnje po glavi stanovnika	600

³²Izvedene koncentracije radionuklida (IK) u životnoj sredini su vrednosti čija primena obezbeđuje da propisane granične vrednosti efektivne doze za stanovništvo ne budu prekoračene.

Za ostale radionuklide koji se mogu naći u hrani i vodi, a za koje nisu izračunate granične vrednosti, određuje se izvedena koncentracija radionuklida (IK_h) na osnovu sledeće formule:

$$IK_h = \frac{GD}{e(g)_{n,ing} \cdot m}$$

gde je:

GD granična vrednost efektivne doze za hranu (osim ređe korišćene hrane) i hranu za životinje, i iznosi 0,1 mSv/godišnje;

$e(g)_{n,ing}$ (Sv/Bq), primljena efektivna doza pri pojedinačnom unosu radionuklida (n), ingestijom (ing). Vrednosti za očekivane efektivne doze po jediničnom unosu radionuklida putem ingestije za stanovništvo i životinje su date u vidu tabela i sastavni su deo „Pravilnika o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije“³³.

Podatak o količini hrane koju pojedinac iz stanovništva unese za godinu dana m (kg), dobija se iz statističkih istraživanja Republičkog zavoda za statistiku. Za količinu hrane koju pojedu životinje koriste se uputstva proizvođača hrane, knjige i priručnici iz ishrane domaćih životinja.

Pod **medicinskim izlaganjem** podrazumeva se izlaganje pacijenata, i lica koja pomažu pacijentima pri medicinskoj primeni izvora jonizujućih zračenja, a nisu profesionalno izložena lica, kao i lica koja su dobrovoljno uključena u programe medicinskih istraživanja uz primenu izvora jonizujućih zračenja. Za ova lica ne postoji zakonski limit za izlaganje zračenju, u zaštiti pacijenata primenjuju se načela opravdanosti i optimizacije izlaganja zračenju.

14.2. Zaštita ljudi i životinja u situaciji vanrednog izlaganja zračenju

Planom za delovanje u slučaju akcidenata³⁴ propisane su mere za sprečavanje i otklanjanje štetnih posledica zračenja na ljude i životnu sredinu. Cilj sprovođenja ovih mera je sprečavanje pojave determinističkih efekata zračenja i smanjenje rizika od pojave stohastičkih efekata zračenja. Za sprovođenje mera zaštite u vanrednim situacijama nadležan je Direktor za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije, a u njihovom izvršenju učestvuju ovlašćena pravna lica za obavljanje poslova zaštite od jonizujućih zračenja. Mere koje se sprovode u vanrednoj situaciji mogu biti **hitne (rane) i dugoročne (kasne) mere**.

Hitne mere koje se sprovode u vanrednim situacijama obuhvataju *mere zaštite ljudi*: evakuaciju, zaklanjanje, dekontaminaciju, zaštitu respiratornih organa i ograničavanje

³³ „Sl. glasnik RS“, br. 38/2011. Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije.

³⁴ „Sl. Glasnik RS“, 30/2018. Uredba o utvrđivanju plana za delovanje u slučaju akcidenta.

korišćenja potencijalno kontaminiranih namirnica, i *mere zaštite životinja*: evakuaciju, dekontaminaciju domaćih životinja, klanje i ekonomsko iskorišćenje domaćih životinja namenjenih ishrani stanovništva (pogledati poglavlje 13). U vanrednoj situaciji kada se proceni da pojedinac može primiti dozu od 10 mSv u periodu kraćem od dva dana, ljudima se preporučuje boravak u zatvorenim prostorijama, dok se evakuacija stanovništva sprovodi u situacijama kada se proceni da pojedinac može primiti dozu od 50 mSv u periodu kraćem od nedelju dana.

Zaštita poljoprivredne proizvodnje u vanrednim situacijama bazira se na sprovođenju niza preventivnih i zaštitnih mera čime se obezbeđuje dobijanje namirnica i hrane za životinje u kojima će sadržaj radionuklida biti ispod propisanog limita. Dužina primene zaštitnih mera zavisi od vrste i perioda poluraspada prisutnih radionuklida, i iznosi od nekoliko nedelja (za kratko živeće radionuklide) do nekoliko meseci ili duže (za dugoživeće radionuklide). Mere koje se sprovode obuhvataju:

- zabranu korišćenja kontaminirane vode i hrane za životinje u kojima je sadržaj radionuklida iznad propisanih limita (tabela 14);
- zaštitu životinja i hrane za životinje od radioaktivne kontaminacije;
- ograničavanje žetve i korišćenja poljoprivrednih proizvoda, pečuraka, lekovitog bilja i šumskih plodova u kojima je povišen sadržaj radionuklida;
- bezbedno uništavanje visoko kontaminiranih poljoprivrednih proizvoda;
- dekontaminaciju domaćih životinja;
- u slučaju potrebe i nemogućnosti evakuacije i/ili obezbeđivanja dovoljno hrane za ishranu domaćih životinja, ekonomsko iskorišćenje stoke putem klanja i prerade mesa dobijenog od ovih životinja;
- ograničavanje ili zabranu upotrebe radioaktivno kontaminiranog mesa divljači;
- zaštitu izvora vode za piće;
- obezbeđivanje alternativnih izvora hrane, vode i hrane za životinje;
- dodavanje zaštitnih sredstava u hranu za životinje (adsorbenti i radioprotektori);
- ograničavanje ili privremenu zabranu lova divljači na radioaktivno kontaminiranoj teritoriji i preduzimanje mera zaštite, očuvanja i monitoringa populacija divljači i njihovog staništa;
- ograničavanje ribolova i davanje preporuka o zaštiti riba u ribnjacima;
- pojačanu graničnu kontrolu sirovina, hrane i hrane za životinje, ukoliko potiču iz zemalja kod kojih u životnoj sredini postoji visoka radioaktivna kontaminacija.

U kasnoj fazi radioaktivne kontaminacije životne sredine (faza oporavka) primenjuju se dugoročne mere zaštite stanovništva i životne sredine: remedijacija kontaminiranog zemljišta, procena doze za kritične grupe stanovništva, dodatni monitoring radioaktivnosti i određivanje prihvatljivog nivoa kontaminacije ispod koga se ne vrši dekontaminacija. Period primene kasnih zaštitnih mera se završava kada rezultati merenja radioaktivnosti u životnoj sredini i dozimetrijska merenja pokažu da je došlo do uspostavljanja normalnih uslova.

Tabela 13. Granice sadržaja radionuklida u životnim namirnicama (Bq/l, Bq/kg) u slučaju nuklearnog akcidenta, iznad kojih se namirnice ne konzumiraju (interventni nivoi)³⁵.

Vrsta radionuklida	Mleko i mlečni Proizvodi (Bq/l)	Druge životne namirnice (Bq/kg)
Izotopi stroncijuma, naročito ⁹⁰ Sr	125	750
Izotopi joda, ¹³¹ I	500	2000
Alfa nestabilni izotopi plutonijuma, transplutonijumski elementi, naročito ²³⁹ Pu, ²⁴¹ Am	20	80
Ostali nuklidi sa vremenom poluraspada većim od deset dana, naročito ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs (isključujući ¹⁴ C i ³ H)	1000	1250

Tabela 14. Granice sadržaja ¹³⁴Cs i ¹³⁷Cs u hrani za životinje (gotov obrok, spreman za upotrebu) posle nuklearnog akcidenta.

Vrsta životinja	Specifična aktivnost (Bq/kg)
Svinje	1250
Živina, jagnjad, telad	2500
Drugo	5000

U vanrednim situacijama veterinari angažovani na sprovođenju mera zaštite životinja i poljoprivredne proizvodnje mogu biti izloženi većim dozama zračenja, zbog čega moraju biti stručno osposobljeni za rad i upoznati sa mogućim zdravstvenim rizikom. Efektivna doza zračenja za lica koja u vanrednim situacijama rade na poslovima prevencije i sanacije posledica radijacionog udesa ne sme biti veća od dvostruke godišnje granice za profesionalno izložena lica. Po završetku intervencije sva angažovana lica se upućuju na zdravstveni pregled.

³⁵Tabele 13 i 14. „Službeni glasnik RS“, 36/2018. Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet.

15. ZAKONSKA REGULATIVA II

15.1. Zaštita životne sredine

Pod radioaktivnom kontaminacijom životne sredine podrazumeva se prisustvo radionuklida u životnoj sredini iznad propisanog nivoa. Životnu sredinu čine površine u radnoj sredini, vazduh, površinske i podzemne vode koje se koriste za piće i zemljište³⁶.

Granice radioaktivne kontaminacije životne sredine određene su na osnovu:

- granica godišnjeg unošenja radionuklida u organizam ljudi i životinja (inhalacijom i ingestijom),
- jačine efektivne doze koja potiče od spoljašnjeg ozračivanja i
- izvedenim koncentracijama radionuklida (*IK*).

Ako se u vodi, hrani ili vazduhu istovremeno nalaze dva ili više radionuklida, ukupna godišnja efektivna doza zračenja ne sme biti veća od 1 mSv godišnje ($\leq 1 \text{ mSv/god}$).

Da bi se sprečila radioaktivna kontaminacije životne sredine produktima ljudskih aktivnosti, zabranjeno je u životnu sredinu odlagati materijal u kome je aktivnost ⁴⁰K veća od 10 Bq/g, i ostalih prirodnih radionuklida veća od 1 Bq/g. Ukoliko je u materijalu sadržaj radionuklida veći od propisanih limita, odlaganje se vrši pod nadzorom Direktorata³⁷.

Zemljište se klasifikuje kao radioaktivno kontaminirano ako se u njemu ili na njegovoj površini nalaze radionuklidi čija aktivnost može dovesti do izlaganja stanovništva iznad propisanih granica (1 mSv/god), pri čemu se razmatra spoljašnje ozračivanje koje potiče od prisustva radionuklida u/na zemljištu i mogućnost kontaminacije vazduha, vode i hrane.

Ukoliko se u zemljištu utvrdi prisustvo radionuklida iznad dozvoljenih granica zabranjuje se korišćenje kontaminiranog zemljišta, postavljaju se obaveštenja i prepreke kojima se onemogućava kretanje preko kontaminiranog zemljišta i pristupa se dekontaminaciji zemljišta³⁸.

³⁶ „Sl. glasnik RS”, br. 38/2011. Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije.

³⁷ Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije.

³⁸ U slučaju vanrednih radioloških situacija dekontaminacija zemljišta, hrane, hrane za životinje i vode se sprovodi prema preporukama Međunarodne agencije u Beču (IAEA).

15.2. Monitoring radioaktivnosti životne sredine

Monitoringom radioaktivnosti životne sredini utvrđuje se prisustvo radionuklida u životnoj sredini i vrši procena nivoa izlaganja stanovništva zračenju. Monitoring se sprovodi u redovnim situacijama izlaganja zračenju, u slučaju sumnje i u toku radiološke vanredne situacije (vanredne radiološke situacije).

Za procenu izlaganja stanovništva zračenju uzimaju se u obzir svi mogući putevi ozračivanja stanovništva, odnosno spoljašnje ozračivanje i unutrašnje ozračivanje. Rezultati monitoringa se koriste za procenu izloženosti stanovništva zračenju, za praćenje promena nivoa zračenja u životnoj sredini i za donošenje odluka o sprovođenju mera zaštite u slučaju da dođe do povećanja nivoa radioaktivne kontaminacije u životnoj sredini.

U Srbiji se za potrebe monitoringa prikupljaju uzorci iz životne sredine se područja Beograda, Vinče, Subotice, Novog Sada, Kragujevca, Niša, Zlatibora, Zaječara i Vranja. Laboratorijske analize u okviru monitoringa rade ovlašćene akreditovane laboratorije.

Za procenu nivoa spoljašnjeg zračenja koriste se automatske merne stanice koje neprekidno mere jačinu ambijentalnog ekvivalenta doze i termoluminiscentni dozimetri, koji se postavljaju na visini od 1 m iznad nekultivisane travnate površine.

Ambijentalni ekvivalent doze ($H^*(d)$) je dozimetrijska veličina koja predstavlja ekvivalent doze koja bi nastala u odgovarajućem polju u okolini izvora jonizujućeg zračenja u ICRU (*eng. International Commission on Radiation Units and Measurements*) sferi na određenoj dubini d . ICRU sfera je fantom koji simulira ljudsko telo, prečnika 30 cm, gustine 1 g/cm i sledećeg masenog sastava: 76,2% kiseonik, 11,1% ugljenik, 10,1% vodonik i 2,6% azot.

Radi procene izlaganja stanovništva zračenju iz životne sredine određuje se sadržaj radionuklida u uzorcima vazduha, padavina, površinskih voda, zemljišta, biljnih kultura, životnih namirnica, vode za piće i hrane za životinje.

Uzorci aerosola uzimaju se kontinuiranim prosisavanjem vazduha kroz filtere poznate efikasnosti. Sadržaj radionuklida u aerosolu određuje se merenjem zbirnih uzoraka metodom gamaspektrometrije. Uzorci čvrstih i tečnih padavina se sakupljaju neprekidno na visini od 1 m iznad nekultivisane travnate površine posebnim uzorkovačem.

Zemljište se uzorkuje sa najmanje tri različite dubine da bi se dobili podaci o raspodeli radionuklida po dubini zemljišta. Određivanje sadržaja radionuklida u padavinama i zemljištu se vrši metodom gamaspektrometrije i merenjem aktivnosti beta zračenja nakon radiohemijskog izdvajanja ^{90}Sr .

Sadržaj radionuklida u uzorcima površinskih voda se meri u zbirnim uzorcima metodom gamaspektrometrije i merenjem aktivnosti beta zračenja nakon radiohemijskog izdvajanja ^{90}Sr , dok se sadržaj ^3H određuje tečnim scintilacionim ili proporcionalnim brojačem. U uzorcima rečnog sedimenta određuje se sadržaj gama emitera i ^{90}Sr . Uzorci površinskih voda i sedimenta se prikupljaju na lokacijama: Dunav (Zemun), Dunav (Vinča), Dunav (Prahovo), Sava (Sremska Mitrovica), Sava (Beograd), Nišava (Piroto), Tisa (Kanjiža), Timok (Knjaževac) i Drina (Loznica).

Za ispitivanje sadržaja radionuklida u lancu ishrane uzimaju se namirnice koje su najviše zastupljene u ishrani ljudi. U redovnim radiološkim situacijama (postojeća i planirana situacija izlaganja zračenju) ispituju se gotovi proizvodi, dok se u vanrednim situacijama ispituju i sirovine koje se koriste za proizvodnju hrane za ljude. Da bi se obezbedio kontinuitet dobijenih rezultata na ispitivanom području, uvek se uzimaju iste namirnice. Namirnice koje se kontrolišu treba da se proizvode na području na kome se procenjuje godišnji unos radionuklida u organizam putem ingestije.

Na ispitivanim lokalitetima u većim ugostiteljskim objektima, restoranima društvene ishrane i obdaništima uzimaju se kompozitni uzorci hrane koji se sastoje od supe, glavnog jela, salate i poslastice. Prilikom izbora biljnih kultura treba izabrati one biljke koje imaju velike listove i čije sazrevanje duže traje. Mleko se prikuplja u mlekarama ili direktno od proizvođača. Ostale namirnice se prikupljaju na zelenim pijacama, u velikim prodavnicama prehrambenih proizvoda ili direktno od proizvođača.

Uzorci hrane za životinje obuhvataju svežu kabastu hranu, suhu kabastu hranu i gotove smeše za ishranu različitih vrsta i kategorija životinja. Sadržaj radionuklida u namirnicama i hrani za životinje određuje se metodom gamaspektrometrije i specifičnim određivanjem sadržaja ^{90}Sr .

U slučaju monitoringa u vanrednim situacijama uzorkovanja treba izvršiti u što kraćem periodu, u skladu sa nivoom akcidenta. Laboratorije angažovane na poslovima monitoringa rezultate dostavljaju Direktoratu za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije u vidu izveštaja koji su dostupni na uvid javnosti na veb sajtu Direktorata (<http://www.srbatom.gov.rs/srbatommm/>).

15.3. Dekontaminacija zemljišta, namirnica životinjskog i biljnog porekla i hrane za životinje

U vanrednim radiološkim situacijama praćenim povišenjem sadržaja radioaktivnih elemenata u životnoj sredini sprovode se mere dekontaminacije zemljišta, namirnica životinjskog i biljnog porekla i hrane za životinje.

15.1.1. Radioaktivna dekontaminacija zemljišta

U slučaju radioaktivne kontaminacije zemljišta primenom odgovarajućih agrotehničkih mera može se smanjiti sadržaj radionuklida u zemljištu i resorpcija radionuklida u biljke putem korenovog sistema. Izbor metode za dekontaminaciju zemljišta zavisi od vrste i perioda poluraspada prisutnih radionuklida. Agrotehničke mere koje se koriste u slučaju prisustva dugoživećih radionuklida su:

1. **Uklanjanje površinskog sloja zemljišta** u tankom sloju od 2 cm do 5 cm. Primenom ove mere sadržaj radionuklida u zemljištu se može smanjiti i do 95%. Sam postupak je veoma skup i složen i sprovodi se na manjim površinama zahvaćenim radioaktivnom

kontaminacijom. Na primer, zemljište na jugu Srbije gde su pronađeni neeksplozirani projektili sa osiromašenim uranijumom je uklonjeno na ovaj način i uskladišteno u Institutu za nuklearne nauke "Vinča", Institutu od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerziteta u Beogradu.

2. **Zaoravanje zemljišta** je mera kojom se postiže „razblaženje“ sadržaja radionuklida u zemljištu, manja dostupnost radionuklida korenovom sistemu biljaka, manja resuspenzija kontaminiranog zemljišta i smanjenje ambijentalne doze zračenja za stanovništvo. U zavisnosti od vrste biljnih kultura, odnosno dubine korenovog sistema biljaka koje se gaje na kontaminiranom zemljištu, zaoravanje može biti plitko ili duboko. Plitko oranje se izvodi uobičajenom mehanizacijom na dubini od 20 cm do 30 cm, čime se postiže smanjenje resorpcije radionuklida od strane biljaka za 50%, dok se spoljašnja doza zračenja može smanjiti za 50% do 90%. Za duboko oranje se koriste veliki plugovi (dubine od jednog metra). Nedostatak dubokog oranja je što se gubi površinski plodni deo zemljišta, a prednost što se usvajanje radionuklida od strane biljaka smanjuje za 90%, a spoljašnja doza zračenja za 50% do 95%.
3. **Primena mineralnih đubriva i poboljšanje kvaliteta zemljišta.** U slučaju kontaminacije zemljišta ^{137}Cs koriste se mineralna đubriva sa visokim sadržajem kalijuma (NPK đubriva). Efikasnost mere je visoka (do 80%) i zavisi od sadržaja kalijuma u zemljištu. U slučaju kontaminacije zemljišta ^{90}Sr koriste se kreč i organska đubriva. Kalcifikacija zemljišta predstavlja dodavanje kreča kiselim zemljištima kako bi se smanjila resorpcija ^{90}Sr od strane biljaka. Efikasnost mere zavisi od sadržaja kalcijuma i pH vrednosti zemljišta. U veoma kiselom zemljištu, sa niskim sadržajem kalcijuma, resorpcija ^{90}Sr se može smanjiti za 50% do 83%. Organska đubriva (stajsko đubrivo, kompost, spropel³⁹ i dr.) su jeftina i lako se primenjuju. Efikasna su u smanjenju resorpcije ^{90}Sr , međutim ako u fisionoj smeši ima ^{137}Cs , ova đubriva pospešuju njegovo usvajanje. Sve navedene agrotehničke mere mogu se primeniti i na samoniklim livadama (pašnjacima) radi smanjenja nivoa radioaktivne kontaminacije. Primenom ovih mera transfer radiocezijuma iz zemljišta u biljke se smanjuje za 50% do 75% u mineralnim zemljištima, i za 67% do 83% u organskim zemljištima. Spoljašnja doza zračenja se smanjuje i do 95%. Transfer ^{90}Sr iz zemljišta u biljke se smanjuje za 50% do 75%, pri čemu se efekat uočava tek u drugoj godini posle primene mera. U slučaju radioaktivne kontaminacije zemljišta kratkoživećim ^{131}I primenjuje se metoda samodekontaminacije zemljišta.

15.1.2. Radioaktivna dekontaminacija namirnica životinjskog porekla

Radioaktivna kontaminacija namirnica životinjskog porekla može biti strukturna i površinska. Strukturna kontaminacija je posledica ishrane životinja radioaktivno kontaminiranom hranom, dok površinska kontaminacija nastaje taloženjem radioaktivnih

³⁹ Spropel je proizvod raspadanja biljaka i drugih živih organizama, planktona i humusa tla, koji se akumulira na dnu slatkovodnih, stajaćih voda.

materija u procesu prerade, transporta i skladištenja sirovina i gotovih proizvoda. Ukoliko su namirnice kontaminirane kratkoživećim radionuklidima (^{131}I) primenjuje se postupak samodekontaminacije. U tom slučaju se namirnice skladište minimum dve nedelje, a pre puštanja u prodaju obavezna je radiometrijska kontrola i veterinarsko-higijenska ocena ispravnosti namirnica.

Namirnice životinjskog porekla kod kojih postoji površinska kontaminacija dugoživećim radionuklidima (suvo meso, neke vrste sireva, jaja) se dekontaminiraju pranjem pod mlazom vode u trajanju od 5 do 10 minuta, a zatim se mehanički odstranjuje površinski sloj debljine od 1 cm do 2 cm. Ukoliko se ustanovi površinska radioaktivna kontaminacija svežeg mesa pristupa se pranju mesa pod mlazom vode, ili polivanjem vodom sa dodatkom vinskog sirćeta ili limunske kiseline (1% do 3% rastvor). Pre puštanja u promet obavezna je radiometrijska kontrola i veterinarsko-higijenska ocena ispravnosti namirnica.

U slučaju strukturne kontaminacije mleka, mesa i jaja dugoživećim radionuklidima primenjuju se odgovarajući tehničko-tehnološki procesi prerade. Ukoliko se preradom namirnica ne postigne smanjenje sadržaja radionuklida ispod zakonskog limita, namirnice se tretiraju kao radioaktivni otpad.

Dekontaminacija mesa se može izvršiti na dva načina, **salamurenjem i kuvanjem pod pritiskom**. Pre kuvanja meso se najmanje jedan čas drži u blagom rastvoru kuhinjske soli i vode. Procesima dinstanja, pečenja, sušenja i slično ne može se smanjiti sadržaj radionuklida u mesu.

Za dekontaminaciju svežeg mleka koriste se metode: magnetne separacije, jonske razmene, elektrodijalize i ultrafiltracije. Takođe, određenim postupcima prerade svežeg mleka može se smanjiti sadržaj radionuklida u finalnom proizvodu. Najjednostavniji način je razblaživanje kontaminiranog mleka nekontaminiranim mlekom.

Kada se u svežem mleku ustanovi prisustvo kratkoživećeg ^{131}I preporučuje se prerada mleka u proizvode sa malim sadržajem mlečne masti (beli sir u kriškama, jogurt i kiselo mleko) ili u mleko u prahu, koje se posle dva meseca i nakon izvršene kontrole može koristiti za ishranu ljudi i životinja. Mleko u kome su prisutni dugoživeći radionuklidi, ^{90}Sr i ^{137}Cs , prerađuje se u proizvode sa visokim sadržajem mlečne masti (maslac 80% do 82%, sireve sa više od 50%, kajmak 65% do 85%) čime se smanjuje nivo ovih radionuklida u finalnom proizvodu.

15.1.3. Radioaktivna dekontaminacija namirnica biljnog porekla

Metode kojima se može izvršiti dekontaminacija namirnica biljnog porekla su:

1. mehaničko uklanjanje površinskog sloja – ljuštenje voća i povrća u debljini od jednog do tri centimetra;
2. pranje pod mlazom vode pod pritiskom;
3. potapanje u 1% do 3% rastvor kuhinjske soli, limunske, sirćetne ili vinske kiseline;
4. namirnice biljnog porekla kod kojih postoji strukturna kontaminacija ili koje se ne mogu dekontaminirati (kukuruz, pšenica, krompir, brašno, šećer) mogu se koristiti za tehničku preradu i dobijanje biogoriva.

15.1.4. Radioaktivna dekontaminacija hrane za životinje

Dekontaminacija hrane za životinje se može izvršiti na tri načina:

1. **samodekontaminacijom**, koja se primenjuje kada je hrana za životinje kontaminirana kratkoživećim radionuklidima. Postupak se izvodi tako što se sveža, kabasta hrana ili koncentrovana hrana za životinje smešta u dobro hermetizovana skladišta u kojima ostaje dok se aktivnost kratkoživećih radionuklida ne spusti ispod propisanih limita;
2. **mešanjem** visoko kontaminirane hrane sa nekontaminiranom hranom (princip radioizotopnog razblaženja), i
3. **uklanjanjem površinskog sloja** kontaminirane hrane. Primena ove mere zavisi od vrste hrane i načina pakovanja i čuvanja hrane za životinje. Sa stogova sena, koji nisu bili dobro zaštićeni tokom taloženja radioaktivnih padavina, uklanja se površinski kontaminirani sloj. Uklonjen sloj se spaljuje u iskopanim, dubokim jamama. Po završenom spaljivanju iskopanom zemljom treba prekriti pepeo, tako da debljina sloja zemlje iznad mesta spaljivanja bude najmanje jedan metar.

16. LITERATURA

1. Ajtić, J., Popović, D. (2014) Biofizika. Centar za izdavačku delatnost, Fakultet veterinarske medicine, Beograd.
2. Ajtić, J., Popović, D. (2014) Praktikum i radna sveska za vežbe iz biofizike. Centar za izdavačku delatnost, Fakultet veterinarske medicine, Beograd.
3. Akleyev, V.A. (2012) Chronic radiation syndrome. Springer.
4. Александров, А.Ю. (2007) Основы радиационной экологии. Йошкар-Ола.
5. Алексахина, Р.М., Корнеева, Н.А. (1992) Сельскохозяйственная радиозкология. Москва, Экология.
6. Al-Masri, M.S., Nashawati, A., Amin, Y., Al-Akel, B. (2006) Transfer of ^{226}Ra , ^{85}Sr and ^{137}Cs from milk to milk products. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 268 (2), 289–295.
7. Antović, I., Antović, N. (2018) Uticaj zračenja na biološke sisteme. Akademska knjiga.
8. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) (1999) Toxicological profile for ionizing radiation. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
9. Babić, R. (2006) Tesla o X zracima. *Vojnosanitetski pregled*, 63 (11), 979-982.
10. Baratta, J. F. (1994) Manual of food quality control 16. radionuclides in food. Food and agriculture organization of the United Nations. Rome, 1994.
11. Barnett, G.C., West, C.M.L., Dunning, A.M., Elliott, R.M., Coles, C.E., Pharoah, P.D.P., Burnet, N.G. (2009) Normal tissue reactions to radiotherapy. *Nat Rev Cancer*, 9 (2), 134–142.
12. Белов, Д.А., Киршин, А.В., Лысенко, П.Н., Пак, В.В., Рогожина, В.Л. (1999) Радиобиология. Москва „КОЛОС“.
13. Belli, M., Tabocchini, M.A. (2020) Ionizing radiation-induced epigenetic modifications and their relevance to radiation protection. *Int. J. Mol. Sci.*, 21 (17), 1–34.
14. Beňová, K., Dvořák, P., Tomko, M., Falis, M. (2016) Artificial environmental radionuclides in Europe and methods of lowering their foodstuff contamination – A review. *Acta Vet. Brno*, 85 (1), 105–112.
15. Benjamin, S.A., Saunders, W.J., Angleton, G.M., Lee, A.C. (1991) Radiation Carcinogenesis in Dogs Irradiated During Prenatal and Postnatal Development. *J. Radiat. Res.*, 32, 86–103.
16. Beresford, N. (2005) Land contaminated by radioactive materials. *Soil Use and Management*, 21(1), 468–474.
17. Bogičević, M., Ilić, Sl. (2007) Nuklearna medicina. Niš, 2007.
18. Brown, D.G., Gramly, W.A., Cross, F.H. (1964) Response of three breeds of swine exposed to whole-body cobalt-60 gamma radiation in daily doses of 100 roentgens. *Am. J. Vet. Res.* 25, 1347-1353.

19. Clarke, R.H., Valentin, J. (2009) *The History of ICRP and the Evolution of its Policies*. ICRP 109. Elsevier Ltd.
20. Clermont, T., Leblanc, A.K., Adams, W.H., Leblanc, C.J., Bartges, J.W. (2012) Radiotherapy-induced myelosuppression in dogs: 103 cases (2002-2006). *Vet. Comp. Oncol.*, 10 (1), 24-32.
21. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Board on Radiation Effects, Research Division on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies (2006) *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation : BEIR VII, Phase 2*. National Academy of Sciences, US.
22. Copplestone, D., Bielby, S., Jones, S.R., Patton, D., Daniel, P., Gize, I. (2001) *Impact assessment of ionising radiation on wildlife*. Environment Agency. R&D Publication 128.
23. Desouky, O., Ding, N., Zhou, G. (2015) Targeted and non-targeted effects of ionizing radiation. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, 8 (2), 247-254.
24. Draganić, I. (1981) *Radioaktivni izotopi i zračenja, Knjiga I - Opšti pojmovi*. Beograd.
25. Draganić, I. (1985) *Radioaktivni izotopi i zračenja, Knjiga II - Radne tehnike*. Beograd.
26. Draganović, B., Đurić, G., Mičić, G. (1982) Efekti dekontaminacije prirodnih radionuklida pri tehnološkoj obradi mesa. *Veterinaria*, 31, (3-4).
27. EPA, U.S. (1984) *Animal investigation program for the Nevada site: 1957-1981*. Las Vegas, Nevada. Washington, DC..
28. EPA, U.S. (2019) *Radiological Emergency: Exposure Assessment of Livestock Carcass Management*. Washington, DC..
29. EPA, US (2016) *PAG manual. Protective action guides and planning guidance for radiological incidents*.
30. European Committee on Radiation Risk (2010) *The Health Effects of Exposure to Low Doses of Ionising Radiation*. Green Audit Press, Castle Cottage, Aberystwyth, SY23 1DZ, United Kingdom.
31. European Union (2019) *European Atlas of Natural Radiation*. Publications Office of the European Union, Luxembourg. Online version.
<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/european-atlas-natural-radiation-0>
32. Fajardo L-G, F.L., Berthrong, M., Anderson, E.R. (2001) *Radiation pathology*. Oxford University Press.
33. Farrelly, J., McEntee, M.C. (2003) Principles and applications of radiation therapy. *Clin. Tech. Small Anim. Pract.*, 18 (2), 82-87.
34. Fesenko, S., Isamov, N., Howard, B.J., Voigt, G., Beresford, N.A., Sanzharova, N. (2007) Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption. *J. Environ. Radioact.*, 98 (1-2), 85-103.
35. Forshier, S. (2009) *Essentials of Radiation Biology and Protection*. Second Edition. Delmar.
36. Geras'kin, S.A., Fesenko, S.V., Alexakhin, R.M. (2008) Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. *Environ. Int.* 34, 880-897.

37. Gerber, G. B., Watson, C. R., Sugahara, T., Okada, S. (1996) International radiobiology archives of long-term animal studies. Pacific Northwest Laboratory. Richland, Washington.
38. Giese, W. (1988) Ammonium-Ferric-Cyano-Ferrat (II) - AFCF as an effective antidote against radiocesium burdens in domestic animal derived food. *Br. Vet. J.*, 144, 363-369.
39. Gilmore, G. (2007) Practical Gamma-Ray Spectrometry. John Wiley & Sons, Chichester.
40. Grdović, S., Vitorović, G., Mitrović, B., Andrić, V., Petrujkić, B., Obradović, M. (2010) Natural and anthropogenic radioactivity of feedstuffs, mosses and soil in the belgrade environment, Serbia. *Arch. Biol. Sci.*, 62 (2), 301-307.
41. Гребенюк, Н.А., Стрелова, Ю.О., Легеза, И.В., Степанова, Н. Е. (2012) Основы радиобиологии и радиационной медицины. Санкт-Петербург, Фолиант.
42. Gunderson, L.L, Joel E. Tepper, J.E. (2012) Clinical radiation oncology. Third edition. Elsevier.
43. Гудков, Н.И., Кудяшева, Г.А., Москалёв, А.А. (2015) Радиобиология с основами радиэкологии. Сыктывкар. Издательство СыктГУ.
44. Gupta, C.G. (2007) Veterinary Toxicology. Elsevier.
45. Hall, E., Giaccia, A. (2019) Radiobiology for the radiologist. Wolters Kluwer.
46. Harb, A.H., Abou Fadel, C., Sharara, A.I. (2014) Radiation enteritis. *Curr. Gastroenterol. Rep.*, 16 (5).
47. Harris, D., King, G.K., and Bergman, P.J. (1997) Radiation therapy toxicities. *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.*, 27 (1), 37-46.
48. Herlin, A., Andersson, I. (1996) Soil ingestion in farm animals. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Agricultural Biosystems and Technology. Report 105. <http://www.nks.org/download/pdf/NKS-Pub/SLU-105.PDF>
49. Hrabak, M., Padovan, R.S., Kralik, M., Ozretic, D., Potocki, K. (2008) Scenes from the past: Nikola Tesla and the discovery of x-rays. *Radiographics*, 28 (4), 1189-1192.
50. IAEA (1989) Measurement of radionuclides in food and the environment. A guidebook. Technical reports 295, Vienna.
51. IAEA (1994) Guidelines for agricultural countermeasures following an accidental release of radionuclides. Technical report 363, Vienna.
52. IAEA (2008) INES, The international nuclear and radiological event scale. User's Manuel, Vienna.
53. IAEA (2010) Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater temperate environments. Technical report 472, Vienna.
54. IAEA (2010) Radiation biology: A handbook for teachers and students. Vienna.
55. IAEA (2012) Guidelines of remediation strategies to reduce the radiological consequence of environment contamination. Technical report 475, Vienna.
56. IAEA (2015) Safety Standard Series: Preparedness and response for a nuclear or Radiological Emergency. Vienna.
57. IAEA-TECDOC-494 (1989) Radioactive fallout in food and agriculture. Vienna.
58. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans (2001) Ionizing radiation, Part 2, Some internally deposited radionuclides. Lyon, France.

59. ICRP (1990) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
60. ICRP (2007) The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
61. ICRP (2008) Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. 38 (4-6).
62. Killion, D.D., Constantin, J.M. (1969) Fallout radiation effects on livestock (Part A). OCD ABrk Unit 3223B. Oak Ridge, Tennessee.
63. Kondo, T. (2013) Radiation-induced Cell Death and its Mechanisms. Radiat. Emerg. Med., 2 (1), 2-5.
64. Krmar, M. (2013) Uvod u nuklearnu fiziku. Novi Sad.
65. Krstić, N., Lazarević - Macanović, M., Milošević, H. (2014) Fizički principi radiološke i ultrazvučne dijagnostike. Autorsko izdanje, Beograd.
66. L'Annunziata, F.M. (2007) Radioactivity introduction and history. Elsevier.
67. L'Annunziata, F.M. (2020) Handbook of radioactivity analysis. Elsevier.
68. Lehnert, S. (2008) Biomolecular Action of Ionizing Radiation. Taylor and Francis Group, LLC.
69. Levine, R.A., Fleischli, M.A. (2000) Inactivation of p53 and Retinoblastoma Family Pathways in Canine Osteosarcoma Cell Lines. Vet. Pathol., 37 (1), 54-61.
70. Лысенко, Н.П., Пак, В.В., Рогожина, Л.В., Кусурова, З.Г. (2017) Радиобиология. Лань.
71. Mauldin, G., Shiomitsu, K. (2005) Principles and Practice of Radiation Therapy in Exotic and Avian Species. Semin. Avian Exot. Pet Med., 14 (3), 168-174.
72. McEntee, M.C. (2006) Veterinary radiation therapy: Review and current state of the art. J. Am. Anim. Hosp. Assoc., 42 (2), 94-109.
73. Michalik, B. (2017) NORM contaminated area identification using radionuclides activity concentration pattern in a soil profile. J. Environ. Radioact., 169-170, 9-18.
74. Mileusnić, D., Durbaba, M. (2012) Radijaciona onkologija. Beograd.
75. Milosavljević, Ž., Krstić, N., Mitrović, B., Macanović-Lazarević, M.L (2017) Effects of experimentally irradiated pituitary gland on some morphological parameters of rats' head, body and tibia. RAD Association Journal. 2 (1).
76. Miljanić, Š. (2008) Udžbenik nuklearne hemije, skripta. Beograd.
http://www.ffh.bg.ac.rs/Dokumenti/Radiohemija/Udzbenik-skripta_RHNH.pdf
77. Mitrović, B.M., Vitorović, G., Vićentijević, M., Vitorović, D., Pantelić, G., Lazarević-Macanović, M. (2012) Comparative study of ¹³⁷Cs distribution in broilers and pheasants and possibilities for protection. Radiat. Environ. Biophys., 51 (1).
78. Mitrović, B., Vitorović, G., Jovanović, M., Lazarević Macanović, M., Andrić, V., Stojanović, M., Daković, A., Vitorović, D. (2014) Uranium distribution in broiler organs and possibilities for protection. Radiat. Environ. Biophys., 53 (1), 151-157.
79. Mitrović, B.M., Jovanović, M., Lazarević-Macanović, M., Janačković, D., Krstić, N., Stojanović, M., Mirilović, M. (2015) Efficiency of sepiolite in broilers diet as uranium adsorbent. Radiat. Environ. Biophys., 54 (2), 217-224.

80. Mitrović, B., Ajtić, J., Grdović, S., Andrić, V., Lazić, M., & Vranješ, B. (2016) Radiocezijum u životnoj sredini planinskih regiona na teritoriji Republike Srbije. Monografija Černobilj 30 godina posle. Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za zaštitu životne sredine „Zaštita“ i Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore. Beograd, 2016, 127-135. ISBN 978-86-7306-138-2
81. Mitrović, B., Ajtić, J., Lazić, M., Andrić, V., Krstić, N., Vranješ, B., Vićentijević, M. (2016) Natural and anthropogenic radioactivity in the environment of Kopaonik mountain, Serbia. *Environ. Pollut.*, 215, 273–279.
82. Mitrović, B., Andrić, V., Šefer, D. (2016) Praktikum iz radiobiologije i radijacione higijena. Autorsko izdanje. Beograd.
83. Mitrović, B., Stojanović, M., Sekulić, Ž., Andrić, V., Vićentijević, M., and Vranješ, B. (2019) Toxicity of high uranium doses in broilers and protection with mineral adsorbents. *Radiat. Environ. Biophys.*, 58 (3), 385–391.
84. Mitrović, M.B., Vranješ, B.R., Kostić, O.A., Perović, V.S., Mitrović, M.M., Pavlović, P. (2019) Radionuclides and heavy metals in soil, vegetables, and medicinal plants in suburban areas of the cities of Belgrade and Paševa, Serbia. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, 34 (3), 278–284.
85. Mitrović, B.M., Vitorović, O., Ajtić, J., Vranješ, B. (2020) Radioactivity in the environment and food chain at Mt. Maljen, Serbia. *Rom. Reports Phys.*, XX, 72 (4).
86. Mitrović, M.B., Todorović, D., Ajtić, J., (2020) A review: natural and artificial radionuclides and radiation hazard parameters in the soil of mountain regions in Serbia. *Journal of Agricultural Sciences*. 65, (1), 1-18.
87. Mitrović, R., Kljajić, R., Petrović, B. (1996) Sistem radijacione kontrole u biotehnologiji. Naučni institut za veterinarstvo „Novi Sad“. Novi Sad.
88. Mladenović, V., Stjepanović, N., Dobrić, S. (2000) Hemijska sredstva u tretmanu interne kontaminacije radioizotopima kod ljudi – dostignuća i pravci istraživanja. *Naučnotehnički pregled*, 8 (6), 51–54.
89. Mitrović, R. (2001) Radioaktivnost u životnoj sredini. Vrelo, Beograd.
90. Moore, A.S. (2002) Radiation therapy for the treatment of tumours in small companion animals. *Vet. J.* 164, 176–187.
91. Moroni, M., Lombardini, E., Salber, R., Kazemzede, M., Nagy, V., Olsen, C., Whitnall, M.H. (2011) Hematological changes as prognostic indicators of survival: Similarities between Gottingen minipigs, humans, and other large animal models. *PLoS One*, 6 (9), 1–8.
92. Morris, J.A. (1988) Review: After effects of Chernobyl accident. *British Veterinary Journal*, 144 (2), 179-186.
93. Mousseau, T.A., Møller, A.P. (2014) Genetic and ecological studies of animals in Chernobyl and Fukushima. *J. Hered.*, 105 (5), 704–709.
94. Ninković, M. (2017) Dilema LNT ili HORMESIS model u zaštiti od zračenja i nuklearno oružje. Zbornik radova XXIX simpozijum DZZ SCG, 27-29.09.2017., 3-15.
95. Petrović, B., Đurić, G., Draganović, B. (1979) Radijaciona higijena animalne proizvodnje. Beograd.

96. Petrović, B., Mitrović, R. (1994) Radijaciona zaštita u biotehnologiji. Beograd.
97. Петровна, О.И., Алексеевна, С.С. (2017) Учебно-методическое пособие для выполнения контрольной работы по дисциплине „Ветеринарная радиобиология“ для студентов заочного обучения по специальности 36.05.01 „Ветеринария“. Иркутск.
98. Пименовой, В.Е. (2009) Основы сельскохозяйственной радиоэкологии. Пермь.
99. Pöschl, M., Nollet, M.L.L. (2006) Radionuclide concentrations in food and the environment. Taylor & Francis Group.
100. Prasad, N.K. (1995) Handbook of radiobiology. CRC Press, Inc..
101. Randall, E.K. (2016) PET-Computed Tomography in Veterinary Medicine. Vet. Clin. North Am. - Small Anim. Pract., 46 (3), 515-533.
102. Reisz, J.A., Bansal, N., Qian, J., Zhao, W., Furdui, C.M. (2014) Effects of ionizing radiation on biological molecules - mechanisms of damage and emerging methods of detection. Antioxidants Redox Signal., 21 (2), 260-292.
103. Rousseaux, G.C., Wanda M. Haschek, M.W., A. Wallig, A.M. (2002) Handbook of Toxicologic Pathology, second edition volume 1. Academic Press.
104. Saračević, L. (1999) Veterinarska radiobiologija sa radijacionom higijenom. Sarajevo.
105. Сашенкова, А.С., Ильина, В.Г., Куликова, Г.Е., Ильин, Ю. Д. (2019) Ветеринарная радиобиология. Пенза.
106. Степанов, Г.В. (2018) Ветеринарная радиобиология. Лань.
107. Severa, J., Bar, j. (1991) Handbook of radioactive contamination and decontamination. Elsevier.
108. Silva, R.D.M. (2015). Ionizing Radiation Detectors, Evolution of Ionizing Radiation Research, Mitsuru Neno, IntechOpen, DOI: 10.5772/60914.
109. Slivka, J., Bikit, I., Vesković, M., Čonkić, Lj. (2000) Gamaspектometrija, specijalne metode i primene. Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.
110. Službeni glasnik RS, 30/2018. Uredba o utvrđivanju plana za delovanje u slučaju akcidenta.
111. Službeni glasnik RS, 36/2018. Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet.
112. Službeni glasnik RS, br. 38/2011. Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije.
113. Službeni glasnik RS, br. 86/2011 i 50/2018. Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima.
114. Službeni glasnik RS, br. 95/2018 i 10/2019. Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti.
115. Službeni list SRJ, br. 12/95 i Službeni glasnik RS br. 85/2005. Zakon o zabrani izgradnje nuklearnih elektrana u Saveznoj Republici Jugoslaviji.
116. Smith, T.J., Beresford, A.N. (2005) Chernobyl - catastrophe and consequence. Springer-Verlag.

117. Sokolov, V.E., Rjabov, I.N., Ryabtsev, I.A., Tikhomirov, F.A., Shevchenko, V.A., Taskaev, A.I. (1993) Ecological and genetic consequences of the Chernobyl atomic power plant accident. *Vegetatio*, 109 (1), 91–99.
118. Stanković, J. (1997) *Osnove radiološke fizike*. Beograd.
119. Stojanović, M. (2006) *Kontaminacija zemljišta Srbije radionuklidima i mogućnost njihove remedijacije*. Monografija, Beograd.
120. Šupić, G., Magić, Z. (2009) Osnovni epigenetski mehanizmi kancera. *Med. Data. Rev.*, 1 (4), 31-36.
121. Tro, K.G., Kujund, R.N., Grbe, I. (2009) Epigenetika i fiziologija gena Epigenetics and gene physiology. *Med. Flum.*, 45 (2), 127–135.
122. Tykva, R., Berg, D. (2004) *Man-Made and Natural Radioactivity in Environmental Pollution and Radiochronology*. Springer Science+Business Media B.V..
123. UNSCEAR (2000) *Sources and Effects of Ionizing Radiations. Report to General Assembly with Scientific Annexes*, United Nations, New York.
124. UNSCEAR (2008) *Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I*.
125. Vegad, J.L. (2007) *A textbook of veterinary general pathology*. International book distributing co. India.
126. Vićentijević, Č. M., Pantelić, K.G., Vuković, Ž.D., Vuković, J.V., Mitrović, M.B., Živanov, Z.D. (2013) The effect of radioprotectors protection ability in pheasants after ali mentary radio-contamination with ¹³⁷Cs. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, 28, (2), 232-236.
127. Vitorović G., Mitrović B., Sinovec Z., Andrić V. (2007) *Praktikum iz radiobiologije i radijacione higijene*. Beograd.
128. Vitorović, G., Mitrović, B., Pantelić, G., Vitorović, D. Stojanović, M., Grdović, S. (2013) Radioaktivnost mleka u Srbiji od Černobilja 1986. do Fukušime 2011. godine. *Vet. Glas.*, 67 (3–4), 237–244.
129. Vitorović, G.S., Mitrović, B.M., Andrić, V.D., Stojanović, M.D., Lazarević-Macanović, M.V., Vitorović, D.P., Vitorovic, G., Mitrovic, B., Andric, V., Stojanovic, M., Lazarevic-Macanovic, M., Vitorovic, D. (2012) Radioactive contamination of food chain around coal mine and coal-fired power stations. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, 27 (4), 388–391.
130. Vogin, G., Foray, N. (2013) The law of Bergonié and Tribondeau: A nice formula for a first approximation. *Int. J. Radiat. Biol.*, 89 (1), 2–8.
131. Voigt, G., Howard, B.J., Beresford, N.A. (2007) Transfer of radionuclides in animal production systems, in *Radioactivity in the Terrestrial Environment*, vol. 10, Elsevier, pp. 71–96.
132. Von Zallinger, C., Tempel, K. (1998) The physiologic response of domestic animals to ionizing radiation: a review. *Vet. Radiol. ultrasound Off. J. Am. Coll. Vet. Radiol. Int. Vet. Radiol. Assoc.*, 39 (6), 495–503.
133. Vranješ, B., Milićević, D., Šefer, D., Stefanović, S., Ajtić, J., Mitrović, B.M. (2020) Presence of natural radionuclides and toxic elements in monocalcium phosphate, complete feed and pig manure. *Sci. Total Environ.*, 720.

134. Зеленская, Л.А., Баюров, Л.И., Радуль, А.П. (2013) Лабораторный практикум по дисциплине „Радиобиология“. Краснодар.
135. Waltner-Toews, D. (1990) Food safety in nuclear crisis: The role of veterinarian. Canadian Veterinary Journal, 31, 361-366.

ISBN-978-86-920303-1-4