

5. EFEKTI NISKIH DOZA I NISKIH BRZINA OZRAČIVANJA NA INDIVIDUE

5.1 Uspešnost reproduktivnosti

Osnovna briga za zaštitu ekosistema je održanje populacije. Informacije od posebnog značaja su da li pad u uspehu reproduktivnosti može uticati na sposobnost vrste da se nadmeće u ekosistemu i da li će uticati na ekološki balans sistema. Reproductivni uspeh (reproduktivna uspešnost) za datu populaciju je povezana sa brojem karakteristika date vrste.

Ovo uključuje:

- (i) Naslednu radio-osetljivost repeoduktivnog tkiva i života u ranoj fazi.
- (ii) Specifične procese koji se dešavaju tokom gametofaze
- (iii) Reproductivnoj strategiji i
- (iv) Istoriju izlaganja

Ipak, problemi na koje nailazimo pri sakupljanju podataka uticaja radioaktivnosti na reproductivni uspeh su heterogeni u smislu izvodjenja testova. Mora biri naglašeno i drugi faktori osim totalne doze i brzinu ozračivanja (*dose rate* - the quantity of radiation absorbed per unit time) utiču na rezultate.

A. Svojstvena radio-osetljivost i plodnost

Faktori svojstvene radio-osetljivosti su kontrolisani od strane genetskih obeležja organizma, i ovo određuje osnovne biološki reparativne procese. Zbog visoke osetljivosi gonodalnog tkiva u ranim fazama života i zato što plodnost direktno utiče na reproductivni uspeh, krajnja tačka plodnosti se uzima za indikator svojstvene radio-osetljivosti. Vršeni su brojni eksperimenti da se opiše ponašanje gameta u ranim životnim fazama ribe i bezkičmenjaka na niske nivoe akutnog i hroničnog zračenja. Kod ribe, ozračivanje može dovesti do usporenog razvoja, ali može izmeniti morfološke i fiziološke osobine kako života u ranoj fazi tako i odrasloj ribi.

Kako akutne doze ozračivanja utiču na reproductciju možemo videti iz laboratorijskih podataka. Doze koje smanjuju plodnost su date u tabeli 5.4

Table 5.4: Acute radiation doses at which significant changes in fertility in invertebrates and vertebrates occur

Group	Dose *(Gy)	References
Invertebrates		
<i>Neanthes arenaceodentata</i> (polychaete worm, adults)	0.5	Harrison & Anderson, 1994a
<i>Gammarus duebeni</i> (amphipod, adult)	2.2	Hoppenheit, 1973
<i>Artemia salina</i> (brine shrimp, juveniles)	9	Holton <i>et al.</i> , 1973
<i>Diaptomus clavipes</i> (copepod, embryos)	10	Gehrs <i>et al.</i> , 1975
<i>Crepidula fornicata</i> (slipper limpet, larvae)	20	Greenberger <i>et al.</i> , 1986
<i>Physa acuta</i> (freshwater snail, adults)	20	Ravera, 1966, 1967
Fish		
<i>Oncorhynchus tshawytscha</i> (Chinook salmon, embryos)	2.5	Welander <i>et al.</i> , 1948
<i>Oryzias latipes</i> (medaka, adult males)	5	Hyodo-Taguchi, 1980
<i>Salmo gairdneri</i> (rainbow trout, 29-d embryos)	6	Konno, 1980
Amphibians		
Newt eggs	0.02	Rose, 1992
Frog spawn	0.20	Rose, 1992
Reptiles		
<i>Uta stansburiana</i> (lizard, adult)	4.5	Tinkle, 1965
Mammals		
Mouse (spermatogonial cells)	0.4	Meistrich <i>et al.</i> , 1978
Mouse (other spermatogenesis cells)	2-600	Meistrich <i>et al.</i> , 1978
Mice (LD ₅₀ , primordial follicles)	0.1	UNSCEAR, 1982
Rat (LD ₅₀ , primordial follicles)	0.7	UNSCEAR, 1982
Monkey (LD ₅₀ , primordial follicles)	10	UNSCEAR, 1982
Human male	0.15	UNSCEAR, 1982
Human female	<0.1-0.5**	UNSCEAR, 1982

Uticaji akutnog ozračivanja na plodnost pokazuju da se reakcija kod bezkičmenjaka i kičmenjaka javlja u tri reda veličine (0.02 do 20 Gy). Iako doze između 0.1 i 1 Gy predstavljaju kritičan opseg u kome su detrimentalni (detrimental) efekti na plodnost najranije zapaženi u različitim radio osetljivim organizmima, doze manje od 0.02 Gy nemaju vidljive posledice na plodnost.

Podaci o hroničnom izlaganju radijaciji pokazuju da doze izlaganja rezultuju značajnim promenama u plodnosti kod bezkičmenjaka i kičmenjaka u velikom opsegu vrednosti, što se može videti u tabeli (5.5).

Table 5.5: Comparison of sensitivity of reproductive tissues of invertebrates and vertebrates exposed chronically to radiation. The doses for fertility are those at which significant changes were noted.

Group	Dose rate* (mGyh ⁻¹)	References
Invertebrates		
<i>Neanthes arenaceodentata</i> (worm, single generation)	0.19	Harrison & Anderson, 1994b
<i>Ophyrotrocha diadema</i> (worm, seven generations)	3.2	Knowles & Greenwood, 1994
<i>Daphnia pulex</i> (water flea, multiple generations)	550	Marshall, 1962
Fishes		
<i>Ameioba splendens</i> (-, single generation)	< 0.6	Woodhead <i>et al.</i> , 1983
<i>Poecilia reticulata</i> (guppy, single generation)	1.7	Woodhead, 1977
<i>Oryzias latipes</i> (medaka, adult males)	2.8	Hyodo-Taguchi, 1980
<i>Oncorhynchus tshawytscha</i> (Chinook salmon, embryos)	4.2	Bonham & Donaldson, 1972
<i>Gambusia affinis</i> (mosquitofish)	13	Trabalka & Allen, 1977
Mammals		
Male Human	0.05	UNSCEAR, 1982; 1992
Female Human	0.023	ibid.
Male Dog	0.07	ibid.

B. Faktori koi utiču na svojstvenoj radio-osetljivost

Parametri koji najverovatnije doprinose svojstvenoj radio-osetljivosti uključuju sposobnost kao što su:

- (i) biološke popravke i
- (ii) ćelijska repopulacija i specijalizacija, koja može da rezultuje zamenom oštećenog tkiva i ćelija.

Biološke popravke uključuju popravke jezrga i citoplazmatskog materijala. Najvažnija stvar kod popravke jezgra su procesi koji uključuju popravku DNK.

Sposobnost ćelija da poprave štetu izazvanu radijacijom je zapažena kada su organizmi posmatrani da bi se pokazala smanjena osetljivost na razlomljene (fractioned) doze. Zaključeno je da se deljenjem doze pomaže da procesi popravke smanjuju štetu. Mehanizmi koji poprimaju najviše pažnje su DNK popravke.

Jedna od izuzetne sposobnosti da popravi DNK je vidjena kod bakterije *Deinococcus radiodurans*, koja je sposobna da preživi čak do 30 000 Gy jonizovanog zračenja. Tolika

doza zračenja uništava hromozome organizma na stotine delića. Ipak, zbog izvanredne sposobnosti oporavka organizam preživljava.

Dobro je poznato da ako ozračimo deljive ćelije nastaje prestanak ciklusa, i kada je nema pauze, ćelije su osetljivije na radijaciju. Pronadene su razni mehanizmi nadgledanja koji detektuju greške, kao što su DNK oštećenja. Za mehanizme nadgledanja se često kaže da su "kontrolne tačke". Miotične kontrolne tačke zahtevaju tri specifične funkcije:

- (i) detekcioni sistem, kako bi se otkrile promene u DNK strukturi
- putni signal da bi se prenela informacija
Radni mehanizam za interakciju sa mašinerijom ćelijskog ciklusa.

Postoje informacije o DNK popravci u nekim vodenim organizmima. Prekid DNK niza je ispitivana u slatkovodnoj ribi. Postoje rezultati eksperimenata da se DNK poravi posle pucanja DNK niza ozračivanjem. Vreme popravke je mnogo sporije kod ne-sisara nego kod sisara. Malo se zna o kvalitetu popravnih procesa, kao i da li se procesi razlikuju medju različitim tkivima.

Ćelije koje učestvuju u repopulaciji mogu biti ćelije koje nikad nisu bile diferencirane (određen tip), kao što su stem ćelije, i drugi tipovi ćelija koji su „odbačeni“ tokom ranog razvoja. Od njihovog otkrića 1998 godine, ljudske embrionske stem ćelije su pažljivo proučavane, zbog njihove primene u rešavanju ljudskih medicinskih problema. Stem ćelije su opisane kao „ćelije koje imaju sposobnost daproizvedu različite ćelijske tipove koje prektivaju telo i mogu biti zamena za tkivo oštećeno starošću, povredom ili bolešću“. Stem ćelije su zapažene kako u odraslog tako i u embrionskom tkivu, i ulažu se veliki naponi kako bi se otkrilo da li mogu da se diferenciraju u bilo koji tip ćelija.

C. Strategija gametogeneze

Procesi koje se događaju tokom gametogeneze i njihovo trajanje značajno utiče na reproduktivnu uspešnost. Procesi gametogeneze se značajno razlikuju od vrste do vrste. Značajni gametogenetski parametri uključuju sposobnost obnove nestale i popravke štetu primarnih klicinih ćelija, trajanje faza u gametogezi, ukupno vreme imedju produkcije i oslobađanja gameta, kao i ukupno vreme do seksualne zrelosti.

D. Reproductivna strategija

Reproduktivni uspeh za datu vrstu je povezan sa reproduktivnom strategijom. Na primer, vrsta koja daje veliki broj potomaka, preživljavanje tokom ranih životnih faza može biti nisko. Kod vrsta koje ne daju veliki broj potomaka, može postojati strategija za zaštitu vrste u ranim životnim fazama, kao što je čuvanje gnezda ili viviparous (da radjaju mladi) razvoj.

E. Istorija izlaganja

Na reproduktivni uspeh vrste u prirodnom ekosistemu takođe utiču i promene u populacionom genetskom stablu zbog multigeneracijskog izlaganja radijaciji i drugim kontaminirajućim materijama. U većini radioaktivno-kontaminiranim ekosistemima, izlaganje flore i faune je hronično, u malim dozama, i višegeneraciono. Ipak, dostupni podaci ovog tipa ozračivanja na reproduktivnost je veoma ograničeno.

F. Zakljuci dobijeni iz reproduktivnog uspeha

Rezultati dobijeni iz studija akutnog i hroničnog zračenja na reproduktivni uspeh kod bezkičmenjaka i kičmenjaka pokazuje postoji veliki opseg osetljivosti između grupa. Ipak, kod nekih životinjskih grupa, reakcije na ćelijskom i molekularnom nivou pokazuku efekte koji su uporedivi sa efektima koji su posmatrani kod nekih sisara. Kod radioosetljivih vrsta, akutne doze veće od 1 Gy i brzina ozračivanja veće od 0.1 mGzh^{-1} mogu uzrokovati sterilitet. Takođe brzina ozračivanja između 0.02 i 0.2 mGzh^{-1} definišu kritičan opseg u kome su detrimentalni efekti na plodnost prvo uočeni.

5.4.2 Indukcija citogenetičkog i genetičkog uticaja na individue

Pokazano je da jonizovana radijacija izaziva kancer zbog štete koju pravai u citogenetskom materijalu. Do direktne štete može doći zbog prenosa energije od radioaktivnog izvora na kritične molekule, prouzrokujući nepopravljivu štetu. Do indirektno štete može doći interakcijom radijacije sa sadržajem ćelije. U ćeliji, molekulski sastav može biti jonizovan, što stvara formacije slobodnih radikala koji mogu oštetiti citogenetski materijal. Javlja se veliki interes oko genetskih efekata zato što oni mogu biti preneti na potomke, zato što mogu da utiču ne samo na reproduktivne procese već i na metabolizam organizma.

Šteta u genetskom materijalu populacije radijacijom ne mora uvek biti loša stvar. Poznato je da se mutacije događaju spontano pod prirodnim okolnostima i da rezultuju varijacijama u genomu vrste. Ipak, porast stope mutacije može biti poguban ukoliko se pogubne mutacije ne izgube u toku prirodne selekcije ili ako se loša DNK ne popravi.

A. promene u fizičkoj strukturi hromozoma

Da dolazi do promene fizičke strukture hromozoma zaključeno je kvantifikovanjem hromozomskih aberacija (CAs), sestrinske hromatidne razmene (SCEs), anafazne aberacije (AAs) i mikronukleidne formacije (MN)

- (i) CAs se javljaju kada posel brisanja ili pucanja hromozoma dolazi do promene sastava koja rezultuje u koncentričnim krugovima, prstenovima, acentričnim fragmentima i td.
- (ii) SCEs se javlja prilikom razmene hromozomskih materijala između sestara hromatida u istom položaju, ali njihov značaj nije još do kraja shvaćen.

- (iii) MN se javlja neposredno pole bucanja hromozoma i nepravilnog ređanja hromozoma u nizu. U slučaju MN analize, fragmenti hromozoma i zalutalih hromozoma se spajaju u „mikrojezgro“ koji su vidljivi u ćeliji i mogu se kvantifikovati
- (iv) AAs se formiraju tamo gde se javlja pucanje hromozoma, pucanja osovine (SPINDLE MALFUNCTION) i stvrđnjavanja hromozoma.

Postoji velika baza podataka o fizičkim promenama u hromozomima koi se javljaju pod uticajem radijacije kod kičmenjaka i bezkičmenjaka. Jedna od prvih citogenetskih studija kod bezkičmenjaka, koju je izvršio Blazlock, pokazuje da je frekvencija novih hromozomskih aberacija značajno veća kod izložene populacije nego kod kontrolne.

Kod ribe, analiza metafaznih hromozoma je radjena *in vivo* na velikom broju vrsta. Kligerman je ozračivao ribu, *Umbra limi*, za dozom od oko 3.25 Gy. Riba poseduje 33 velika metacentrična i submetacentrična hromozoma, i opseg se može lako dobiti iz velikog broja tkiva. U uzračennoj grupi, javlja se oko 30% ne normalnih metafaza po ribi, dok u kontrolnoj grupi samo 0.03%.

B. Promene u molekularnoj strukturi hromozoma

Direktna ili indirektna šteta naneta DNK može da rezultuje nepopravljivom štetom ili da izmeni genetski materijal, a rezultati mogu biti odmah vidljivi ili mogu biti zakasneli. Značajna šteta se javlja kada se jave promene na genomičnom šablonu. Takve šablonske promene mogu dovesti do lošeg zapisa, dominantne smrtonosne mutacije ili do ne postojanja zapisa.

1950-ih i 1960-ih godina proučavane su indukcije mutacije posle izlaganja gameta, mladih i odraslih jedinki na relativno visoke doze radijacije. Većina ovih studija je vršena na ribama. Mutacije su se manifestovale kao

- (i) povećane abnormalnosti embriona
- (ii) povećana smrtnost embriona
- (iii) izmene u genetskoj regulaciji
- (iv) modifikovano ponašanje

U studijama vršenim na ribama i bezkičmenjacima u skorije vreme, vrhunska tehnologija je razvijena za analzu molekularnih promena u ljudima i model organizmima je modifikovana za korišćenje na bezkičmenjacima i ribi. Šteta naneta DNK molekulima je kvantifikovana analizom pucanja DNK niza. Pucanje DNK niza je bitno za proučavanje osetljivosti DNK na radijaciju kao i mogućnost popravke DNK.

Proučavane su i molekularne promene hromozoma kod kičmenjaka i bezkičmenjaka u hemijski zagađenim sredinama.

C. Zaključak o efektima citogenetike i genetike

Indetifikovano je mnoštvo krajnjih tačaka i/ili biomarkera koji pružaju informacije o citogenetičkim i genetičkim efektima radijacije, dok čak neki pružaju osetljivost uporedivu kod krajnje tačke plodnosti. Prednosti genetskih krajnjih tačaka je da neke od njih se mogu izvoditi brzo i nemaju ograničenje vezano za kariotip i ne zahtevaju veliki broj ćelija u mitozu. Takođe, posle izlaganja radijaciji u kontrolisanim laboratorijskim uslovima, krajnje tačke imaju potencijal korišćenja u terenskim uslovima.

5.6 Dozimetrija okruženja

Važno pitanje je da li će radioaktivnost iz antropogenih izvora imati loše dugoročne posledice na organizme, i da li će loše uticati na ekosistem. Da bi se došlo do odgovora na ova pitanja moramo znati podatke o više parametara. Ovo uključuje vrstu i količinu oslobođene radioaktivnosti, dozu ili brzinu ozračivanja kojima je populacija bila izložena uticaj jonizujućeg radijacionog zračenja na molekulskom i ćelijskom nivou i na nivou organizma, i kako ove promene mogu biti ublažene promenama u organizmu i okolini.

5.6.1. Načini izlaganja

Organizmi koji naseljavaju radionukleidne-kontaminirane ekosisteme primaju:

- (i) eksterne doze od radionukleida prisutnih u vazduhu, u rastvoru, i rastvorenih u vodi, kao i onih nataloženih na zemljištu
- (ii) interne doze koje su akumulirane u određenim tkivima iz vazduha, hrane i vode.

Za svako mesto, mečavina i broj postojećih radionukleida se može značajno razlikovati, i radionukleidi mogu biti oslobođani različitom brzinom. Dalje, konačna sudbina i postojanje radionukleida zavisi od fizičkih i hemijskih karakteristika ekosistema. Razvoj generičkih dozimetrijskih modela možda nije praktičan. Ipak, razmatranje ranije konstruisanih modela će pomoći u indetifikovanju parametra koji se uzimaju u razmatranje za komparativne rizike na populaciju u različitim vrstama ekosistema.

5.6.2 Dozimetrijski modeli

Korišćeno je više različitih pristupa tokom razvijanja modela pri izračunavanju brzine ozračivanja na vodenim organizmima. Za neke modele, predpostavlja se da je stabilno stanje dostignuto ili posle jednokratnog ili posle kontinualnog otpuštanja. U nekim slučajevim su korišćeni atmosferski i vodeni transportni modeli da bi se procenio broj oslobođenih radionukleida i njihova kranja distribucija u komponentama ekosistema.

Dozimetrijski modeli su razmotreni u NCRP izveštaju (1991) i u UNSCEAR izveštaju (1996). Kasnije, dozimetrijski modeli su definisani na sledeći način: „U biti kao matematička konstrukcija koja dozvoljava se proceni deponit energije u određenoj meti iz date distribucije radionukleida.“ Razmatranja koja su uključena u model su razlike u apsorbovanoj dozi u zavisnosti od oblika i veličine, u zavisnosti od načina na koji su izloženi radioaktivnosti, i u zavisnosti od emitovane energije od strane radionukleida.

Opisani dozimetrijski modeli podrazumevaju iste radijacione kvalitativne faktore kod ne-ljudi kao i kod ljudi. Kod ljudi, glavna briga je indukcija raka, stohastički efekti, dok kod divlje i domaće flore i faune glavna briga je smanjena sposobnost za reprodukciju, deterministički efekti.

5.7. Nesigurnosti i neizvesnosti

5.7.1. Nepotpuna baza podataka o efektima radijacije

Trenutno, na procenjivanje uticaja radionukleida na ekosisteme utiče pravljenje pretpostavki o potencijalnim efektima zato što odgovori na radijaciju ne-ljudskih vrsta koš nije karakterisano. Razmatranje dosadašnjih informacija pokazuje može da se očekuje veliki opseg u reakciji u okviru vrste. Ovo se može videti ako uporedimo reakcije u dve krajnje različite vrste, ljudi i *polyschete crv* (tabela 5.9). Kod žena, razlika između doze koje uzrokuje smrtnostii utiče na plodnost je za oko faktor 40 (2.5 vs.0.06 Gy). Zato što parametri koji utiču na svojstvenu radio-osetljivost uključuju i sposobnosti za biološku popravku i ćelijsku repopulaciju i specijalizaciju, potrebno je doći do više podataka o njihovim uticajima na radio-osetljivost.

5.7.2 Adaptivne promene

Postoji mnoštvo podataka koji pokazuju da niske doze radijacije mogu uzrokovati promenama u ćeliji koji reflektuju sposobnost da adaptiraju efekte radijacije. Ovaj fenomen je nazvan „*adaptivna promena*“ i može da utiče na linearnu teoriju za predicanje radijacione štete. Viđene manifestacije adaptivnog odgovora kod sisara su ubrzan rast, ubrzana reproduktivna sposobnost, produžen životni vek, mutacije... Adaptivne promene i njeni efekti sa okolinom mogu postati važna tema u budućnosti.

5.7.4. Interakcija radionukleida sa drugim kontaminantima

U većini okolina, prisutni su kako organski tako i neorganskizagađivači. Ipak, malo se zna kakvu pojačanu štetu može izazvati njihova interakcija. Većina laboratorija se bavi samo jednim kontaminantom. Zbog brige kako kontaminanti utiču na plodnost, od posebnog interesa je grupa organskih kontaminanta koji štete endokrinim procesima. Postoje organski kontaminanti koji oponašaju, blokiraju ili remete produkciju prirodnih hormona i prouzrokuju značajne reproduktivne efekte u divljim životinjskim populacijama.

EFEKTI JONIZUĆEG ZRAČENJA NA EKOSISTEME

Tokom cele istorije planete Zemlje, živi organizmi, ujedinjeni u zajednice i ekosisteme, su bili izloženi jonizujućem zračenju. Izlaganje prirodnom kosmičkom zračenju i izlaganje radionukleidima u geološkom sloju Zemljine kore je variralo vremenom.

Tokom druge polovine 20-tog veka, pojavila se velika količina jonizujućeg radijacionog zračenja koju je stvorio čovek. Svi živi organizmi na Zemlji su počeli da primaju dodatno zračenje iz atmosfere, zbog testiranja nuklearnog oružja. Pored ovog svetskog rasipanja radioaktivnosti, manje oblasti su izložene pojačanim iradijacionim nivoima. Ovo uključuje test područja za nuklearno oružje, područja za zakovanje i skladištenje radioaktivnog otpada...

Pojačani radijacioni nivoi u regionima kontaminiranim od strane nuklearnih eksplozija su od posebnom ekološkog značaja. U ovim oblastima, brzina ozračivanja i kumulativne doze mogu dostići vrednost koje rezultuju radijacionom štetom na organizme, štetu nekim zajednicima i ekosistemima, i čak da prouzrokuju njihovu smrt.

6.1 Zdravlje populacije i ekosistema

Iako individualne životinje mogu umreti, stalno rađanj i smrt individua generalno rezultuje stabilnom populacijom koja se ne menja mnogo tokom vremena. Ipak, populacija vrste ne živi u izolaciji. Njen opstanak je vezan za interakciju sa populacijama drugih vrsta. Dobrobit populacije je determinisana integritetom ekosistema. Remećenjem ovog integriteta se preta samom postojanju ekosistema, sa obzirom da jedna promena izaziva promene drugih delova ovakovog povezanog sistema.

Moguća su dva tipa poremećaja sistema:

- Promene prvog tipa su reverzibilne i povezane su sa promenom u dinamici nasleđivanja, na primer, produženog trajanja nekih faza kod nasleđivanja ili „vraćanje“ Jedne od ranijih faza. Ovo može rezultovati delimičnom degradacijom ekosistema
- Promene drugog tipa su ireverzibilne, tako čineći razvoj nasleđivanja ekosistema nemogućim.

6.2 Reakcija na izlaganje

Pri ozračivanju prirodnih zajednica biljaka i životinja, uočljivi efekti se mogu desiti: i sekvencijalno i stalno na različitim nivoima biološkog organizma: od molekularnog i ćelijskog nivoa, do nivoa organizma, populacije i samog ekosistema. Na nivou ekosistema moramo da razmotrimo različite reakcije koje će se dogoditi kao efekti ozračivanja u promenama strukture i funkcionisanja samog ekosistema. Široko govoreći modifikacije ozračenog ekosistema se mogu podeliti u dve glavne klase:

- Promene direktnim zračenjem uključuju efekte izazvane jonizujućim zračenjem na živim organizmima u njihovom staništu.

- Posmatrane sekundarne (indirektne) promene u ozračenom ekosistemu se javljaju kada je jedna ili više komponenti ekosistema oštećena, tako kvareći normalan balans ekosistema.

6.3 Radioecological situations for study of effects

Radijacioni efekti u prirodnim i agrikulturnim sistemima su od praktičnog interesa u situacijama kada jonizujuće zračenje potiče od radionukleida prisutnih u prirodnom okruženju. Ovo može biti slučaj kod otpuštanja radionukleida stvorenih od strane ljudi, ili od prirodnih radionukleida u regionima gde je njihova koncentracija visoka. Sa metodološkog aspekta, radijacioni efekti u prirodnom okruženju su najtemeljnije proučavani u regijama:

- gde se nalaze nuklearna postrojenja
- na mestima gde se skladište i zakopava radioaktivni otpad
- gde su eksplodirale nuklearne naprave
- sa visokim pozadinskim prirodnim zračenjem

Ovakva radioekološka istraživanja u prirodnom okruženju predstavljaju prednost pri proceni radijacionih efekata dok organizmi žive u njihovim sredinama.

6.4 Radioekološka istraživanja posle nuklearnih nesreća

Situacije koje se dešavaju posle radijacionih nesreća sa otpuštanjem radioaktivnih supstanci su od posebnog interesa. Radioekološka istraživanja pokrivaju šume, livade, jezera, reke, životinje, agrikulturne useve i druge tipove sistema.

Sa radiološkog mesta gledišta sledeće osobine su karakteristične za nuklearne nesreće praćene nekontrolisanim otpustom radioaktivnih supstanci u okolinu.

Prvo, brzina primljene radijacije i povećanje kumulativne doze, po pravilu se smanjuju rapidno zbog raspadanja kratko živećih radionukleida.

Drugo, ekosistem izložen radioaktivnoj kontaminaciji je heterogen u prostoru i vremenu.

Treće, većina situacija povezanih sa transferom radionukleida u sredini je vođena dugoživećim nukleidima koji postoje u atmosferi (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu ...). Ovo rezultuje dugotrajnom kontaminacijom i stalnim pojačanjem pozadinskom radijacijom. Situacija evoluira sa karakterističnim povećanjem izlaganja živih organizama u njihovim sredinama pri relativno niskim dozama tokom dugog perioda vremena.

Kao rezultat, mogu se razlikovati nekoliko perioda u dinamičkom razvoju u odnosu na uticaj radijacije u ekosistemu.

Prvi period karakterišu najintenzivniji uticaji radijacije na ekosistem (velika brzina zračenja i kumulativne doze). Tokom ovog perioda procesi direktne radijacione štete dominiraju ekosistemom. Oni su iskazani u funkcionalnoj nesposobnosti živih organizama koju su najosetljiviji na radijaciju.

U drugoj (srednjoj) fazi, javlja se akutna radijaciona šteta, kao i smanjenje brzine zračenja. U ovom periodu se odvijaju procesi radijacionog oporavljanja na molekulima DNK, što rezultuje radio-adaptacijom radiootpornih individua koje su preživele efekte akutne radijacije.

Treća, i najduža, je faza razvoja ozračenog ekosistema.

U slučaju ispusta radionukleida u okolinu, mogu se formirati takozvane vruće tačke, koje mogu nastati zbog povećanog fizičkog zadržavanja radionukleida od neke komponente ekosistema.

Kumulativne doze su te koje određuju efekte radijacije na okolinu. Ipak, odnos nije direktno proporcionalan, na efekte utiču u brzina radijacije i početne reakcije na nivou ekosistema. Pošto je veoma teško da se izmeri doza jonizujućeg radijacionog zračenja iz radionukleida koji migriraju u prirodnom okruženju, procena apsorbirane doze je veoma problematična.

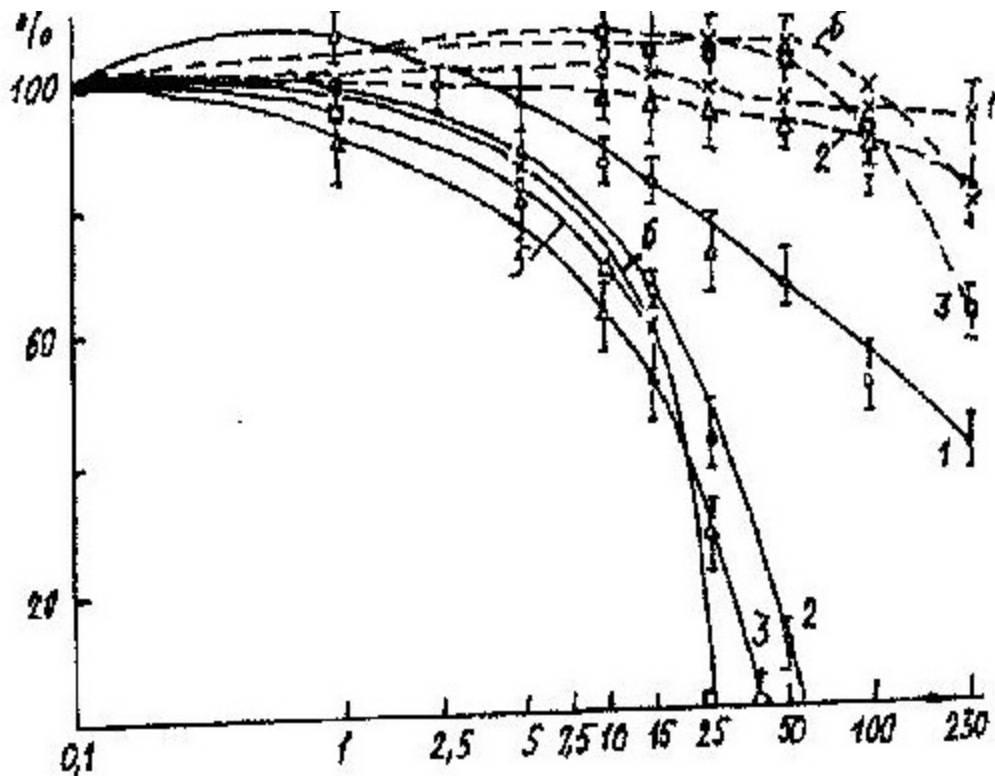
Dozimetrija alfa emitujućih radionukleida koji migriraju u prirodnom okruženju je posebno teška. Tako da uspostavljanje odnosa između sadržaja nekog alfa emitera u okruženju (gustina kontaminacije) i radijacionih efekata u ekosistemu postaje opravdanija.

6.5 Ozračivanje pod kontrolisanim uslovima

Pored radioekoloških posmatranja efekata jonizujućeg zračenja u oblastima sa povećanom radioaktivnom kontaminacijom (posebno na mestim radijacionih nesreća), postavljene su ustanove za ozračivanje gde se većina parametara može kontrolisati.

Cilj je da se uspostavi precizna kvantitativna pretpostavka između dozno-efektnog odnosa na nivou ekosistema. U velikom broju država su izvođeni visokobudžetni eksperimenti. Ozračivanje traje od nekoliko nedelja do nekoliko godina, sa velikim opsegom brzine ozračivanja i kumulativnih doza.

Pri ozračivanju sa relativnom niskom brzinom, uočeni fenomeni kod biljaka i životinja mogu biti objašnjeni kao adaptacija na radijaciono izlaganje što vodi do povećane radio otpornosti živih organizama na intenzivnije ozračivanje. Izraženo je mišljenje da je razlog zašto se biljke i životinje adaptiraju na veštački pojačano pozadinsko zračenje može biti povezano sa genetskim promenama ili eliminacijom najmanje radio osetljivih individua iz populacije.



6.6 Uticaj kombinovanih efekata faktora okruženja

U prirodnom staništu, jonizujuće zračenje je jedini ekološki faktor koji utiše na ekosistem. Pod kombinovanim efektom jonizujućeg zračenja i drugih ekoloških faktora, posmatranje sinergije, dodavanja ili kompenzacije je moguće.

Radioekološke promene na nivou ekosistema mogu biti posmatrane preko brojnih faktora od kojih su najvažniji:

- očuvanje strukture ekosistema
- stalna raznovrsnost među vrstama
- broj individua po jedinici površine (gustina)
- očuvanje komponenta produktivnosti koje dominiraju u ekosistemu
- očuvanje reproduktivnog potencijala (plodnosti) dominantnih vrsta.

6.7 Opseg radio otpornosti i limit doza

Stalna je praksa da se procenjuje radio otpornost ekosistema preko njene dominantne komponente (drveće u šumi).

Opseg radio otpornosti kod dominantnih biljaka u ekosistemu je oko 1000. Vidljivi efekti kod najosetljivijih biljnih zajednica se zbivaju manjim opsezima na dozama od oko 1 Gy, dok je limit kod najotpornijih biljaka oko 20000 Gy posle čega nastupa smrt.

6.8 Zaključak

Pri dugačkom izlaganju radioaktivnih supstanci u okolinu mogu se razlikovati dve grupe radioekoloških posledica:

- direktne radijacione povrede organizama u njihovim staništima (do povreda celih ekosistema) i
- radioaktivna kontaminacija objekata okoline (uključujući floru i faunu) bez vidljivih povreda. Treba biti naglašeno da radijacione povrede od radioaktivne kontaminacije mogu biti posmatrane na svim nivoima organizacije biološkog fenomena, od molekulskih i ćelijskih do populacije i ekosistema. Što je ovaj nivo niži, niže su i brzina ozračivanja i kumulativna doza pri kojima se javlja radijaciona promena. Ovaj fenomen je povezan sa procesima post-radijacionog oporavka koji su isto posmatrani na svim nivoima biološke organizacije. Prirodno, u ozračivanje prirodnog ekosistema na svim nivoima su uključeni i radijacione povrede i post-radijacioni oporavak i totalni efekat radijacije na navišem nivou.

Table 6.4: Radioecological effects at the Chernobyl site (Alexakhin, 1993)

Effects	Dose (Gy Year ⁻¹)	¹³⁷ Cs deposition	
		Ci km ⁻²	MBq m ⁻²
Damage to ecosystems			
Coniferous forests	10	>300	>11.1
Deciduous forests	30	>1000	>37.0
Damage to mammals			
cows, sheep	50	200	7.4
Damage to grass ecosystem	30	Not found	
Early genetic effects	0.1	50	1.85
Life-span dose for humans (70 years) 0.35 Gy	0.1	50	1.85
Permissible levels of ¹³⁷ Cs contamination:			
Milk	10 ⁻⁸ Ci kg ⁻¹ (370 Bq kg ⁻¹)	5-15	0.185-555
Meat	2 10 ⁻⁸ Ci kg ⁻¹ (740 Bq kg ⁻¹)	40	1.48
Grain	10 ⁻⁸ Ci kg ⁻¹ (370 Bq kg ⁻¹)	>100	>3.7