

**Rīgas Tehniskā universitāte
Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju
institūts**

Andrejs Pavļenko

**ELEKTRONU PARAMAGNĒTISKĀ
REZONANSE UZKRĀTO RADIĀCIJAS
DOZU MĒRĪŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Vadītājs: Dr.habil.phys., prof. N. Mironova-Ulmane

Konsultants: Dr.habil.phys., prof. J. Dehtjars

Rīga, 2006

Darba aktualitāte

Apmēram daži desmiti tūkstoši iedzīvotāju (6500 Latvijas iedzīvotāji) tika iesaistīti 1986. gadā notikušās Černobiļas atomelektrostacijas avārijas seku likvidācijā. Pašreiz šie cilvēki pārstāv hroniski slimu cilvēku grupu ar dominējošām kuņģa un zarnu trakta, muskuļu-balsta un nervu sistēmu slimībām. Tikai daļai no šīs ļaužu grupas tika oficiāli dokumentētas dozas diapazonā no 0,01 līdz 0,25 Gy. Šai dozai ir zema stohastiskā efekta iespējamība, izslēdzot pilnībā deterministisko efektu. Tomēr oficiāli dokumentētās dozas ir pakļautas kritikai, jo, mērot ar individuāliem dozimetriem, tiek ietverta tikai ārējā fotonu ekspozīcija." Iekšējā ekspozīcija, absorbēto nukleīdu iradiācija, netiek ievērota. Tas ir saistīts ar ticamu dozu mērījumu trūkumu. Darbs tiek veltīts jaunu tehniku attīstīšanai, lai novērtētu reālās individuālās dozas, kas attiecīgi sekmēs avārijas seku likvidētāju ārstēšanu un rehabilitāciju.

Mērķi un uzdevumi

Darba mērķis ir attīstīt elektronu paramagnētiskās rezonanses (EPR) dozimetriju, lai mērītu uzkrātā jonizējošā starojuma absorbētās individuālās dozas.

Lai sasniegtu mērķi, bija jāveic sekojoši galvenie uzdevumi:

1. Paraugu sagatavošanas ietekmes pētīšana EPR mērījumiem un labākās tehnoloģijas izvēle;
2. EPR mērījumu režīmu ietekmes pētīšana uz nosakāmo signālu;
3. EPR dozimetrijas kļūdu kopuma noteikšana;
4. EPR dozimetrijas sistēmas atbildes faktora analīze;
5. EPR dozimetrijas verifikācija attiecībā pret satrptautiskajiem standartiem;

6. EPR potenciālo iespēju demonstrēšana individuālo retrospektīvo dozu novērtēšanā (Černobiļas AES avārijas seku likvidētājiem).

Zinātniskā novitāte

Pirmo reizi tika sasniegti šādi rezultāti:

- Tika veikta cilvēka zobu emaljas dozimetrija, kuras pamatā ir EPR signāls uzkrātā jonizējošā starojuma absorbēto individuālo dozu mērīšanai;
- Tika pētīta paraugu sagatavošanas ietekme uz EPR mērījumiem, nodrošinot apstākļus lielākai signāla un trokšņa attiecībai un samazinot fona signālu. Tika attīstītas rekomendācijas par paraugu sagatavošanas tehnoloģiju;
- Atkarībā no noteiktā EPR signāla tika noteikti:
 - EPR zobu emaljas mērījumu režīmi;
 - Optimāla mikroviļņu jauda;
 - Reģistrācijas temperatūra;
 - Spektra apstrādes procedūra;
- Tika noteikts cilvēka zobu emaljas EPR dozimetrijas kļūdu kopums; EPR metodes standarta kļūda ir zem 30% dozu diapazonā 100 - 500 mGy;
- Cilvēka zobu emaljas EPR dozimetrija tika starptautiski pārpaudīta.

Verifikācija

Attīstītā tehnika tika pārbaudīta starptautisko standartu līmenī, pateicoties veikto kalibrēto dozimetrisko datu salīdzināšanai ar 30 laboratorijām visā pasaulē.

Izmantošana

Attīstītā tehnika tika izmantota medicīniskos pētījumos Aroda un Radiācijas Medicīnas Centrā P. Stradiņa Klīniskajā universitātes slimnīcā. Dozas, kas mērītas ar EPR metodi, tika izmantotas, lai izraudzītos piemērotas ārstēšanas un rehabilitācijas procedūras Černobiļas AES avārijas seku likvidētājiem. EPR dozimetrijas datu pamatā tika izstrādāti un aizstāvēti 2 medicīnas doktoru promocijas darbi.

Publikācijas

1. A. Pavlenko, E. Pakers, N. Mironova-Ulmane, U. Ulmanis, M. Zakaria. Some problem of radiation protection in Latvia. Proc. of Conference of Applied Physics, Kaunas (2000) pp.75-78
2. A. Pavlenko, N. Mironova-Ulmane, M. Zakaria. Status and Technology of Personnel Dosimetry in Latvia. Latvian Journal of Technical Science. N5 (2000) pp.65-74
3. N. Mironova-Ulmane, A. Pavlenko, T. Zvagule, T. Karner, R. Bruvere, A. Volarte. Retrospective dosimetry for Latvian workers at Chernobyl. Radiation Protection Dosimetry, Nuclear Technology Publishing. Vol. 96 (1-3) 2001 pp. 237 -240
4. T. Zvagule, N. Mironova-Ulmane, A. Pavlenko, T. Karner, R. Bruvere, N. Garbuseva, A. Volrate. Retrospective Dosimetry and Clinical Follow-up program for Chernobyl Accident Clean-up workers in Latvia. Proc. of the IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe, Dubrovnik, Croatia, May 20-25 2001. CD-ROM 60-03 (1-6) (ISBN 953-96133-3-7)

5. N. Mironova-Ulmane, A. Pavlenko, M. Eglite, E. Curbakova, T. Zvagule, N. Kurjane. Chernobyl clean-up workers: 17 years of follow-up in Latvia. Recent Advances in Multidisciplinary Applied Physics, pp.9-19, Elsevier Science 2005 (ISBN 0 08 0444 696-5)

Disertācijas rezultāti tika ziņoti un apspriesti konferencēs

1. European Workshop on Individual Monitoring of External Radiation, Helsinki, Finland 4-6 September, 2000.
2. IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe, Dubrovnik, Croatia, May 20-25, 2001.
3. European Medical and Biological Engineering Conference, EMBEC-2002, Vienna, Austria, 4 -8 December.
4. International Conference on Applied Physics, APHYS-2003, Badajoz, Spain, 13-18 October

Promocijas darba struktūra

Darbs satur ievadu, 8 nodaļas, 42 zīmējumus, 9 tabulas un secinājumus.

Darba teksts sastāda 111 lapas ar 180 atsaucēm uz izmantoto literatūru.

IEVADS

Vairāk kā pirms 100 gadiem kopš rentgenstaru un radioaktivitātes atklāšanas, cilvēki gūst labumu, izmantojot jonizējošo starojumu. No otras puses radiācijas kaitīgums katram cilvēkam kļūst acīm redzams, kas dod nepieciešamību ierobežot radiācijas ekspozīciju vai devu.

Profesionālā radiācijas aizsardzības doza ir parasti atvasināta no personāla dozimetru monitoringa. Šaubīgos gadījumos vai neiespējamās personāla dozimetrijas un sagaidāmas pārmērīgas ekspozīcijas, avārijas dozimetrijas apstākļos tiek izmantotas speciālas dozimetrijas metodes. Cieta stāvokļa TLD un EPR metodes ir efektīvas ierīces dozu novērtēšanai. Šīs metodes ļauj mērīt integrētās absorbētās dozas daudzus gadus pēc notikušās avārijas un veikt dozu rekonstrukciju vietām un cilvēkiem, kur tās laika gaitā nav novērtētas [1].

Aptuveni 6500 Černobiļas atomreaktora avārijas seku likvidētāji, Latvijas iedzīvotāji, piedalījās laika posmā no 1986 - 1991. Mūsdienās viņi pārstāv hroniski slimu cilvēku grupu [2], kas slimo ar progresējošām slimībām, t.i., kaulu, muskuļu un saistaudu, gremošanas un respiratorām slimībām, kā arī nervu sistēmas un sensoro orgānu slimībām.

Saskaņā ar oficiālajiem dokumentiem šo cilvēku saņemtās dozas ir robežās no 10 - 250 mGy. Šīs dozas atbilst ikgadējam limitam, ko rekomendē Starptautiskā atomenerģijas aģentūra (International Atomic Energy Agency - IAEA) [3], Radiācijas aizsardzības starptautiskā komisija (International Commission on Radiological Protection - ICRP) [4] un noteiktas vietējos noteikumos [5], kā robeža, zem kuras neviens radiācijas izraisīts efekts nevarētu eksistēt. Tomēr minētās dozas atbilst tikai ārējai ekspozīcijai un tās tika reģistrētas tikai 1/3 no minētās ļaužu grupas.

1997. gadā pirmo reizi dozu novērtēšanai Latvijas iedzīvotājiem, kas piedalījušies Černobiļas avārijas seku likvidācijas pasākumos, tika izmantota EPR. Metode demonstrēja oficiālu dozu zemu novērtējumu ar 2-4 faktoru. Veiktais Instrumentālais Neitronu Aktivācijas Analīzes tests parādīja palielinātu Sr koncentrāciju izrautajos zobos robežās no 20-350 Bq/g. Tas atļauj pieņemt, ka puse no absorbētās dozas, un dažos gadījumos pat vairāk, var būt par cēloni ^{90}Sr starojumam un dažu citu šķelšanās produktu starojumam, piemēram, ^{137}Cs [6].

Darba rezultāti varētu tikt pielietoti Černobiļas AES avārijas seku likvidētāju ārstēšanā un rehabilitācijā un nodrošināt papildu ieguldījumu radioloģiskos pētījumos. EPR metodes pielietojums varētu būt pieņemams ārstēšanas plānošanā un retrospektīvo individuālo dozu novērtēšanā kodolmedicīnas un radioterapijas pacientiem.

1. Jonizējošais starojums un tā bioloģiskie efekti

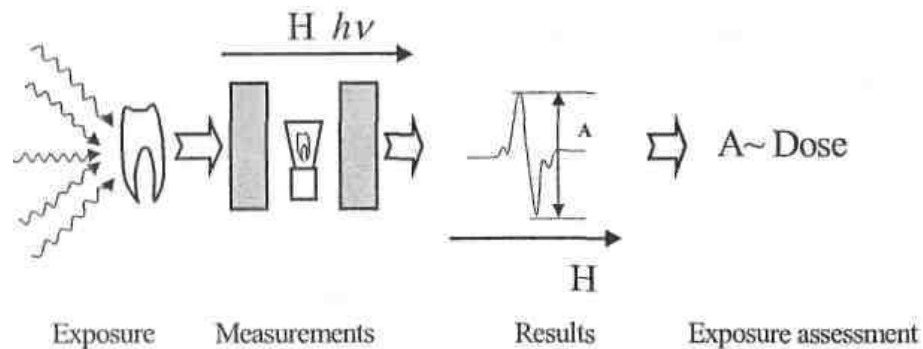
Nodaļā ir apskatītas galvenās koncepcijas aizsardzībā pret jonizējošā starojuma ekspozīciju, ieskaitot jautājumus par radiācijas fizikālo un bioloģisko mijiedarbību, tās deterministisko un stohastisko efektu.

2. Radiācijas aizsardzība un individuālā dozimetrija

Nodaļā ir apskatītas eksistējošas metodes dozu novērtēšanai, ieskaitot ārējās un iekšējās dozimetrijas metodes, kā arī individuālo dozu noteikšana pēc apkārtējās vides monitoringa datiem. Galvenokārt šī nodaļa koncentrēta uz EPR tehnoloģiju dozu novērtēšanai. EPR metode ir salīdzināta ar citām retrospektīvām metodēm un eksistējošu individuālo dozu noteikšanas pētījumiem. Labi attīstīta TLD metode tiek izmantota kā EPR dozimetrijas rezultātu pārbaudes tehnoloģija.

3. EPR instrumentācija

Zobu emaljas EPR mērījumi tika veikti istabas temperatūrā, izmantojot X-diapazona PE-1306 spektrometru, kas darbojas 9.4 GHz frekvencē. EPR dozimetrijas iekārtas darbības shematisks attēlojums ir dots 1. attēlā:



1. attēls. EPR dozimetrijas tehnoloģijas shēma.

Radikāli, kas rada jonizējošo starojumu emaljā, tika mērīti, ievietojot paraugu magnētiskajā laukā un papildus pakļaujot augstfrekvences elektromagnētiskajam starojumam [7]. Specifiska lieluma magnētiskā laukā notiek elektromagnētiskā starojuma absorbcija. EPR spektrometrs reģistrē pirmais atvasinājums no absorbcijas līknes un atvasinājuma amplitūda ir proporcionāla uzkrāto radikāļu daudzumam, kas ir proporcionāls absorbētai dozi.

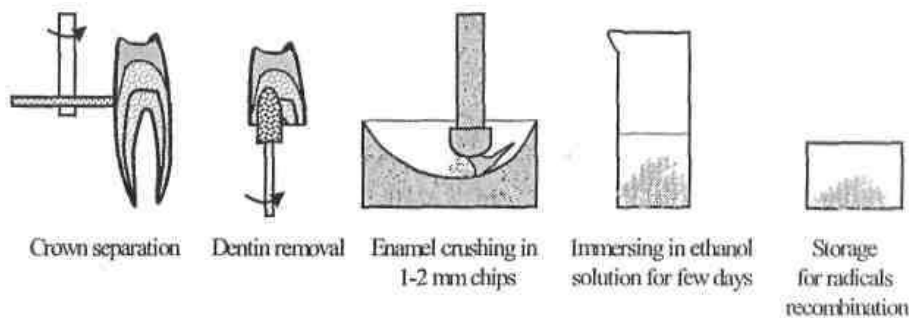
Lai uzlabotu signāla/trokšņu attiecību, dotais EPR spektrometrs izmanto augstfrekvences magnētisko lauku modulācijas kombinācijā ar fāzu-jūtīgu noteikšanu. Šāds sakārtojums veido signāla/trokšņu attiecību, kura lielums ir lielāks kā būtu iespējams bez tā.

EPR spektrometra darbība ir optimizēta trīs tehnisko parametru virzienos, izvēloties mikroviļņu jaudu, magnētisko lauku un signāla kanālu komponentes.

4. Paraugi, to apstarošana un EPR ietekme

2. attēlā ir parādīta sekojoša paraugu sagatavošanas metodika. Precīzāks šīs procedūras apraksts ir sniegts [8], kas ar svarīgām modifikācijām tika izmantota eksperimentu veikšanai. Paraugu sagatavošanas tehnoloģijas kritēriji bija dozimetriskā signāla atdalīšana no fona signāla un signāla/trokšņu attiecības palielināšana.

Zobi tika ekstrahēti pacientiem klīnikā stomatoloģiskās ārstēšanas laikā. Zoba vainadziņš tika mehāniski atdalīts no saknes. Dentīns tika noņemts ar cietsakausējuma zobu urbi.



2. attēls. Paraugu sagatavošanas procedūra.

Uzmanība tika pievērsta tam, lai paraugs nepārkarstu, izvairītos no dozimetriskā signāla izzušanas un papildus radikālu veidošanos, kas nav saistīti ar dozimetriju. Emalja tika saberzta 1-2 mm gabaliņos, izmantojot ahāta piestu un piestalu. Paraugi tika uzglabāti etilspirta maisījumā vairākas dienas, lai tos attaukotu un izžāvētu. Paraugi tad tika uzglabāti vairākas dienas mehāniski ierosinātu radikālu rekombinācijai. Pirms mērījumiem paraugi tika ievietoti desikātorā, kas satur atkvēlinātu silikagēlu, turpmākajai žāvēšanai.

Šādas apstrādes rezultātā tika samazināta dabiskā signāla amplitūda un tika optimizēta signāla/trokšņa attiecība. Emaljas nogulsnes tika

nosvērtas uz analītiskajiem svāriem un ievietotas kvarca ampulās EPR spektroskopijas mērījumiem. Optimālais svārs paraugam bija aptuveni 100 mg.

Paraugu apstarošana ar gamma fotoniem ar vidējo enerģiju 1,12 MeV tika veikta gamma kontūrā, kas ir uzstādīta Latvijas Kodolpētniecības centrā.

Šajā nodaļā ir apspriesti sekojoši EPR signāla ietekmējošie faktori:

- Apkārtējās vides faktori;
- Metaboliskā modifikācija;
- Enerģijas atkarība.

Visiem šiem faktoriem ir nozīmīga ietekme uz EPR spektru un attiecīgi tiek novērtēta doza. Tika ierosinātas šo ietekmējošo faktoru samazināšanas iespējas.

5. EPR uztveršanas režīmi

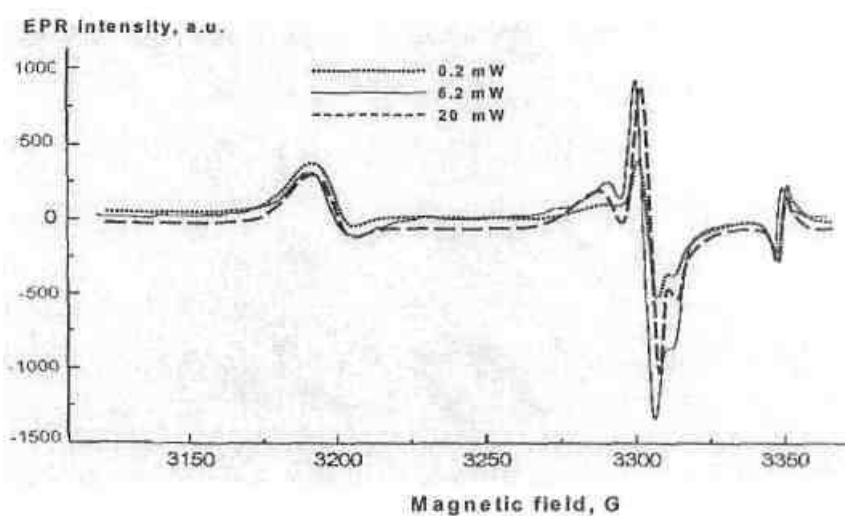
Tika optimizēti spektrālo mērījumu parametri starp maksimālu jutību un laika taupīšanu no vienas puses, un pēc iespējas vairāk informācijas iegūšanu no otras puses.

EPR signāli palielinās kā kvadrātsakne no mikroviļņu jaudas līdz lēnam piesātinājumam un tad samazinās signāla intensitāte. Mikroviļņu jaudas novirze ļauj atdalīt dozimetrisko signālu no fona un palielināt signāla/trokšņu attiecību. Mikroviļņu jaudai palielinoties, palielinās "dosimetriskā signāla/fona signāla" attiecība, kamēr signāla/trokšņu attiecība samazinās. Tika atrasts kompromisa mikroviļņu jaudas lielums ar lielāko signāla/trokšņu attiecību, kas ir 6,2 mW, (skat. 3. attēlu).

EPR izšķirtspēja parasti palielinās zemās temperatūrās, kas ļauj noteikt precīzu EPR spektra struktūru. Dotajā darbā zemas temperatūras

efekts uz zoba emaljas EPR spektru tika pētīts, lai optimizētu mērījumu apstākļus.

Tika atrasts, ka galvenā dozimetriskā signāla amplitūda ($g \sim 2,0$) nav atkarīga no temperatūras. Zemās temperatūrās tuvu 4,2 K EPR signāls parāda dažas struktūras, bet EPR radikāļu struktūras noteikšana bija ārpus dotā darba uzdevumiem. Dotajā pētījumā tikai dozimetriskā signāla amplitūda bija svarīga, jo tā tieši ir saistīta ar zobu emaljas absorbēto dozu.



4. attēls. Mikroviļņu jaudas ietekme uz EPR spektru.

Tika veikti fona un dozimetrisko signālu matemātiskā simulācija, lai tuvinātu zobu emaljas EPR spektru ar mērķi atdalīt tos vienu no otra. Metode tika pielietota kombinācijā ar Gausiana funkciju abiem - fona un dozimetriskiem signāliem. Ir atrasts, ka šāda tuvināšana veido lielu vispārēju kļūdu EPR mērījumiem, kas radusies no individuālas formas fona signāla katram emaljas paraugam. Tādēļ tika nolemts lietot papildus apstarošanas metode dozu noteikšanai.

6. Kļūdu kopums

Tika lietota EPR rekonstrukcijas dozu kļūdu noteikšanas koncepcija, kas ir līdzīga prezentētajās ISO rekomendācijās [9] un iztīrītās [10] Ir sekojošas kļūdas, kas saistītas ar zobu emaljas absorbcijas dozu mērījumiem, un tās ir nepieciešams ņemt vērā individuālo dozu kļūdas noteikšanai [11] $U_{EPRDOSE}$

- Paraugu apstrādes kļūda (U_{sam});
- Dozimetrijas signāla samazināšanas kļūda (U_{fad});
- Mērījumu kļūda (U_{EPR});
- Dabiskā fona dozas kļūda (U_{back});
- EPR dozas aprēķināšanas metodes kļūda (U_{cal});
- Emaljas metaboliskās modifikācijas kļūda (U_{met}).

Tādējādi kļūdas varētu grupēt:

$$U_{EPRDOSE} = (U_{sam}^2 + U_{fad}^2 + U_{EPR}^2 + U_{back}^2 + U_{cal}^2 + U_{met}^2)^{1/2} \quad (1)$$

pamatojoties uz pieņēmumu, ka visas individuālās kļūdas nekorelē.

Paraugu apstrāde

Tika eksperimentāli atrasts, ka vidējā aritmētiskā kļūda (U_{sam}) dotā parauga apstrādes tehnoloģijai (skat. 1.attēlu) ir aptuveni 10%.

Dozimetrijas signāla samazināšana

Nav pierādījumu, ka dozimetrijas signāla samazināšanās sekmētu kombinēto EPR rekonstrukcijas dozas kļūdu zobu emaljai. Tāpēc $U_{fad} = 0$.

EPR mērijumi

EPR mērijumu kļūda (U_{EPR}) ir spektrometra trokšņa radītā kombinēta kļūda (U_{noise}), parauga pozicionēšanas kļūda rezonējošā dobumā (U_{posit}) un spektrometra stabilitātes kļūda (U_{stab}):

$$U_{EPR} = (U_{noise}^2 + U_{pos}^2 + U_{stab}^2)^{1/2} \quad (2)$$

Zobu emaljas EPR dozimetrijas signāla intensitāte ir pārklāta ar troksni spektrā no diviem avotiem - augstas frekvences un zemas frekvences trokšņiem. Turpmākajiem aprēķiniem tika pieņemts spektrālā trokšņa līmenis $U_{noise} = 12\%$ no analizējamā signāla amplitūdas.

EPR signāla intensitāte ir atkarīga no parauga pozicionēšanas variantiem. Kļūda U_{pos} tika noteikta eksperimentāli un tā parasti sastāda apmēram 2 %.

Spektrometra jutība ir viens no svarīgākajiem parametriem, kas ietekmē EPR mērijumu precizitāti. Spektrometra stabilitāte tika pārbaudīta ar MgO: Mn²⁺, Cr³⁺ standarta kristālu, kuru ievietoja rezonatorā kopā ar paraugu. Tas ļauj samazināt spektrometra stabilitātes kļūdu tuvu 7%.

Kopējā kļūda EPR mērijumiem (U_{EPR}), ieskaitot (U_{noise}), (U_{pos}), (U_{stab}) ir 14% no dotās EPR signāla amplitūdas.

Dabiskā radiācijas fona ieguldījums

Dabiskā radiācijas fona dozas tipiskais lielums Latvijas iedzīvotājiem ir 1mGy gadā. Šis lielums tiek apstiprināts ar TLD dozimetriem un tiek aprēķināta pieļaujamā vidējā radiācijas fona ekspozīcija 100 nGy/st. Kļūda (U_{back}) ir pieļauta aptuveni 3%.

EPR dozas aprēķināšanas metodes kļūda

Dotajā darbā tika izmantotas papildus dozu noteikšanas metodes, lai iegūtu EPR dozimetriskā signāla atkarību no irradiācijas dozas. Tika pieņemta linerā sakarība un pielietota minimālā kvadrātu metode.

Cita procedūra dozu rekonstrukcijai vai radiācijas fona spektra atdalīšanas metode tika izslēgta no turpmākiem pētījumiem, zinot eksperimentālu faktu, ka fona signāls atkarīgs no individuālām īpatnībām. Kopumā standarta rekonstrukcijas dozas kļūda dotajai procedūrai dažreiz pārvar 80%, tādēļ kļūdas samazināšanai tika nolemts lietot aditīvu dozu metodi.

Zobu emaljas paraugi tika apstaroti Gamma kontūrā Latvijas Kodolpētniecības centrā. Šajā gadījumā kopējā kļūda varētu tika noteikta sekojoši.

Gaisa kermas dozas kļūda apkopo pozicionēšanas kļūdu (U_p) un kombinēto radiācijas avota kļūdu (U_{source}).

Parauga pozicionēšanas kļūda (U_p) un dotā instrumenta kļūda ir noteikta 2 %.

Kombinētā starojuma avota kļūda (U_{source}) ietver vēl papildus faktorus, kas ietekmē zobu emaljas saņemto dozu, kā temperatūras svārstības, mitrums, spiediens un starojuma avota izmaiņas spontānā sabrukšanā. Dotā irradiācijas instrumenta visu šo faktoriem ieguldījums ir aptuveni 10%.

Irradiācijas laika kļūda (U_t) tika noteikta apmēram 5 %.

Korekcijas faktors k ir noteikts, pamatojoties uz Monte Karlo elektronu transporta modelēšanu zobu emaljā. Lielums k tika iegūts no [12] un kļūda (U_k) tika pieņemta mazāka kā 3%.

Tā kā tika izmantota aditīvā dozu metode EPR dozu noteikšanai, kur absorbētā doza nav mērīta tieši no EPR amplitūdas lieluma, bet ekstrapolēta no dozas, kas nomērīta ar TLD metodi. Tāpēc nepieciešams

pievienot TLD mērījumu kļūdu (U_{TLD}), kas tika iepriekš noteikta 16%. Turklāt ir nepieciešams pievienot lineārās regresijas aproksimācijas kļūdu (U_{app}), kas tika novērtēta aptuveni 3%.

EPR dozas aprēķināšanas kļūda ietver visas augstākminētās kļūdas.

Pieņemot, ka šīs kļūdas nav saistītas viena ar otru, tad:

$$U_{cal} = (U_p^2 + U_t^2 + U_k^2 + U_{source}^2 + U_{TLD} + U_{app})^{1/2} \quad (3)$$

Tika aprēķināta EPR aprēķināšanas dozas kļūda (U_{cal}), kas ir vienāda ar 0,201 un turpmākajos novērtējumos atzīta par 20%.

Zobu emaljas metabolisma novērtēšanas kļūda

Zobu emaljas metabolismam ir ievērojams ieguldījums EPR signālā un tas ir stingri individuāli atkarīgs lielums. Šajā darbā metabolisma ieguldījums kopējā kļūdā ir noteikts 10 %, turklāt mērījumiem netika izmantota zoba bojātā daļa.

EPR rekonstrukcijas dozas kombinētās standarta kļūdas noteikšana

Kļūdas noteikšanas pamatā ir dažādi augstāk minētie ieguldījumi un formula (1), kopējā EPR rekonstrukcijas dozu rezultātu kļūda ($U_{EPRDOSE}$) kopējā standarta kļūdā sastāda 28,3%, vai zem 30 %, radiācijas dozām intervālā no 100 mGy - 500 mGy, pamatojoties uz pieņēmumu, ka kļūdas (U_{sam}), (U_{EPR}), (U_{back}), (U_{met}), (U_{fad}) un (U_{cal}) savstarpēji nekorelē. Šīs kļūdas ir pamatotas tikai fotonu ekspozīcijām ar enerģiju virs 300 keV. Dotais kombinētās kļūdas novērtējums varētu būt raksturīgs ideālā gadījumā, kur papildus ieguldījumu faktori nav ietverti.

7. EPR mērījumu pārbaude ar TLD metodi

Šajā nodaļā ir aprakstīta eksistējoša dozimetrijas TLD metode, kas tiek pielietota Latvijā, ietverot materiālus, tehniku un ietekmējošos faktorus, kā arī atzītu TLD kalibrēšanas metodi.

TLD metodes novērtējuma veikšana un kļūdas

TLD dozimetru dozas D aprēķināšana ir veikta pēc sekojošas formulas:

$$D = \left(\frac{1}{S_i} (TL_{meas} - TL_{bgr}) \right) \cdot K_{cal} \cdot K_E \cdot K_F \cdot K_A, \quad (4)$$

kur S_i - Termoluminiscences (TL) detektora individuālā jutība, TL_{meas} - TL izmērītā izejas strāva no detektora, TL_{bgr} - TL fona signāls no detektora, K_{cal} - TLD lasītāja kalibrācijas koeficients, kas parāda saistību starp izmērīto TL strāvu un absorbēto dozu Sv; K_E - TL detektora enerģijas atkarības korekcijas koeficients; K_F - dozimetrijas signāla samazināšanas korekcijas koeficients; K_A - TLD detektora leņķiskās atkarības korekcija.

Dozas noteikšanas formulu dotajā vienādojumā var pārrakstīt kā:

$$D = (C_{meas} - C_{bgr}) \cdot K_{cal} \cdot K_E \cdot K_F, \quad (5)$$

kur $C_{meas} = (TL_{meas} - TL_{instr})/S_i$ (6)

Lai aprēķinātu kombinēto standarta kļūdu, visas kļūdas vajadzētu aplūkot kā nekorelējoši ieejas lielumi un aprēķināti saskaņā ar sekojošu formulu:

$$u(D) = (u_{C_{meas}}^2 + u_{C_{bgr}}^2 + u_{K_{cal}}^2 + u_{K_E}^2 + u_{K_F}^2 + u_{K_A}^2)^{1/2}, \quad (7)$$

kur U_i ir standarta kļūda katram ieejas lielumam. Dozas D standarta kļūdas noteikšanas piemērs saskaņā ar [7], dozai $D = 10 \text{ mSv}$ ir parādīta zemāk.

Standarta kļūdas lielumi $U(C_{meas})$ and $U(C_{bgr})$ tika aprēķināti saskaņā ar Puasona statistiku nejaušiem fizikāliem procesiem daļiņu emisijai un saskaitīšanai. Šajā gadījumā $U(C_{meas})$ and $U(C_{bgr})$ ir aprēķināts pēc minimālās kvadrāta metodes mērījuma lielumam un $C_{meas} = 10000$ skaitam un $C_{bgr} = 10$ skaitam; $U(C_{meas}) = 1\%$ un $U(C_{bgr}) = 3\%$.

Kļūdas $U(K_{cal})$ ir aprēķināta, pamatojoties uz TLD sistēmas kalibrācijas faktoru. Lielums $U(K_{cal})$, ieskaitot standarta laboratorijas irradiācijas kļūdu un statistisko novirzi dozimetru nolasījumiem, ir noteikta ne lielāka kā 5%.

Kļūda $U(K_E)$ ir novērtēta no TLD atbildes enerģētiskās atkarības. Dotās analīzes kļūda ir pieņemta $U(K_E) = 10\%$.

Kļūda $U(K_F)$ ir pieņemta kā mēneša monitoringa intervāls, tā ir mazāka kā 3%.

Kļūda $U(K_A)$ norāda uz TLD leņķiskās atkarības kļūdu; turpmākiem aprēķiniem $U(K_A)$ lielums ir noteikts 10%.

Izmantojot vienādojumu (7) var aprēķināt TLD mērījumu kļūdu, kas ir 16% 10 mSv lielai devai. Lielākām dozām ir iespējams samazināt mērījumu kopējo kļūdu, bet leņķa un enerģijas atkarība saglabājas kā galvenie kļūdu veicinātāji.

TLD sniegums

TLD sistēmas sniegums tika novērtēts saskaņā ar starptautiski eksistējošu standarta procedūru. 1999. gadā TLD laboratorija ņēma daļību Starptautiskā Starpvalstu Salīdzināšanas procedūrā radioloģiskiem mērķiem, ko organizē Starptautiskā Atomenerģijas Aģentūra (IAEA).

Šis process ietver dažādus pasākumus: dozimetru izsūtīšanu uz Starptautisko Atomenerģijas aģentūru (IAEA), apstarošanu laboratorijā un atgriešanu atpakaļ dalībniekiem, kur dozas tika mērītas.

Piecpadsmit dozimetri tika nosūtīti uz IAEA, no kuriem 9 tika apstaroti Vācijā (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) un seši tika izmantoti radiācijas fona kontrolei. Apstarošana tika veikta 420 kV rentgenstaros, izmantojot ūdens fantoma 300x300x150 mm plāksnes. Izvēlētais starojums ietver krišanas leņķi 0° kā pamatdatu un darba vietas modelēšanu, mainot krišanas leņķi starp +80° un -80°. Nomināls attālums un krišanas leņķis tika mērīts ar izšķirtspēju 0.1 mm un 0.1°. Standarta kļūda bija robežās 2-5-2.5%. Pievadītās dozas dozimetriem bija robežās no 5 to 30 mSv. Dozimetru mērījumu rezultāti, ko veica Latvijas TLD laboratorija, tika ziņoti kā koriģēti dozimetru atbildi Q

$$Q = \frac{Hp(10)_{std}}{HP(10)_{mes}} \quad (8)$$

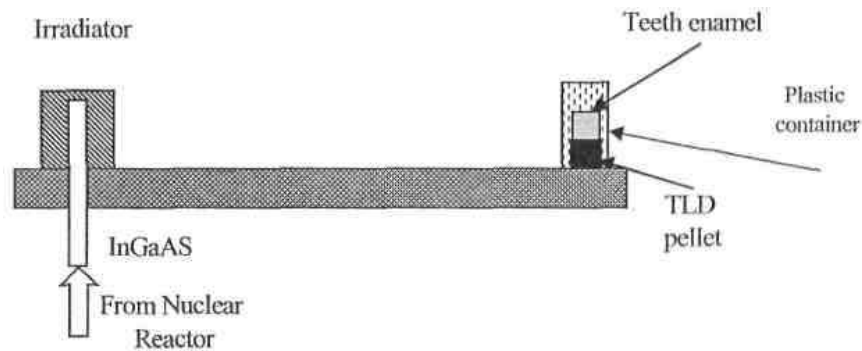
kur $Hp(10)_{std}$ ir personāla ekvivalentās dozas, ko ziņoja standarta apstarošanas laboratorija un $HP(10)_{mes}$ ir lielums, ko mēra laboratorijā.

Saskaņā ar Starptautiskajiem normatīviem Q lielumam vajadzētu būt starp zemāko un augstāko kļūdas robežu (-33% ÷ +50%) dozām, kas ir lielākas par 10 mSv. Starptautiskās salīdzināšanas rezultāti rāda, ka lielumi, kas ir izmērīti TLD laboratorijā, atrodas starptautiski pieļaujamās robežās.

EPR verifikācija

Zobu emaljas paraugi tika apstaroti gamma staros Gamma kontūrā, kas tika uzstādīta Latvijas Kodolpētniecības Centrā. Vidējā gamma fotonu enerģija bija 1,12 MeV. TLD dozimetrijas metode tika pielietota kā

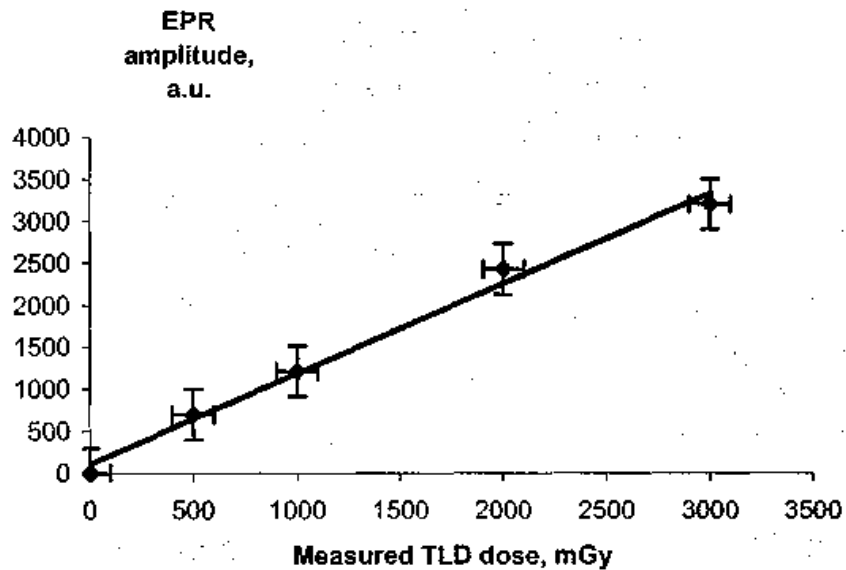
kalibrācijas metode EPR dozu mērījumiem. TLD tablete tika lietota zobu emaljas papildus apstarošanas laikā kā absorbētās dozas atsaucē dozimetrs. Starojuma nepakļautu indivīdu zobu emalja kopā ar atsaucē TLD tika ievietoti vienā plastmasas konteinerā, lai sasniegtu sekundāru elektronu līdzsvaru. Konteiners tika novietots uz darba galda, nodrošinot vienādu attālumu no starojuma avota līdz zoba emaljai un atsaucē TLD (skat. 4. attēlu).



5. attēls. EPR signāla amplitūdas kalibrēšana ar TLD metodi.

Izmantojot doto apstarošanas procedūru, tika pieņemts, ka TLD absorbētā doza ir vienāda ar zobu emaljas absorbēto dozu. Ekspozīcijas laiks variēja no 1 līdz 10 minūtēm, kas tika kontrolēts izmantojot hronometru. TLD detektora absorbētā doza tika mērīta ar TLD sistēmu, kas dod zobu emaljas atsaucē dozu.

EPR signāla kalibrācijas līkne ir parādīta 5. attēlā.



6. attēls. EPR signāla amplitūda atkarībā no absorbētas dozas.

Viens sākuma un četri papildus apstarošanas punkti tika lietoti kalibrācijas līknē, pieņemot lineāru regresiju starp absorbētām dozām un EPR signālu.

8. Pielietojums

Avārijas likvidētāju medicīniskais statuss

Klīniskie pētījumi tika veikti Aroda un Radiācijas Medicīnas Centrā P. Stradiņa Klīniskajā universitātes slimnīcā.

Medicīnisko pētījumu rezultāti tika salīdzināti ar kontroles grupu - 237 Iekšlietu Ministrijas darbiniekiem, kas atbilstoši vecumam nebija pakļauti profesionālai radiācijas ekspozīcijai. Kontroles grupas sīkāki medicīniskie testi tika sadalīti saskaņā ar profesiju, uzturēšanās ilgumu, individuālajām raksturīgajām īpašībām.

Pēc slimību struktūras (1992-2000) tika pētītas kaulu, muskuļu, saistaudu gremošanas un respiratīvo orgānu slimības, kā arī nervu un jušanas orgānu slimības [13].

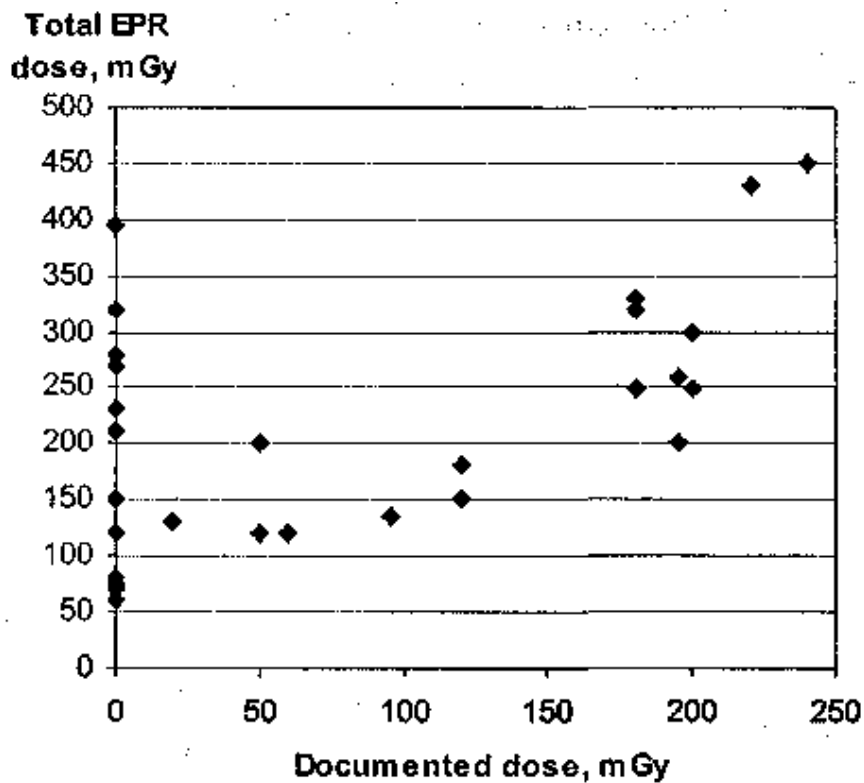
Slimību dominējošais līmenis Černobiļas atomreaktora avārijas seku likvidatoriem ir daudz augstāks nekā attiecīga vecuma grupas populācijai, kas pakāpeniski palielinās pat 10-15 gadus pēc likvidācijas darbiem Černobiļā [14]. Nervu sistēmas slimības, kuņģa, asinsvadu, garīgu traucējumi, muskuļu un saistaudu slimības ir visbiežāk sastopamas avārijas likvidētāju grupai.

Imūnās sistēmas pētījumi parāda leikocītu spēju veidot interferonus 2-3 reizes mazāk tieši atomreaktora avārijas seku likvidētājiem, salīdzinājumā ar kontroles grupu ($p < 0,001$) [15, 16]. Saskaņā ar šiem rezultātiem, lielākajai daļai Černobiļas avārijas seku likvidētājiem ir konstatēts endogēno interferonu deficīts, kas norāda uz imūnsistēmas nomākumu.

Zobu emaljas absorbētās dozas mērījumi

Darba rezultātā tika izmērītas Černobiļas AES avārijas likvidētāju grupas zobu emaljas absorbcijas dozas. Mērījumu rezultāti norāda atšķirību starp oficiāli dokumentētām dozām un dozām, kas ir nomērītas ar EPR metodi (skat. 6. attēlu). Kopumā EPR dozas ir dažas reizes augstākas kā oficiāli dokumentētās dozas.

Ir novērots, ka EPR dozas ir lielākas par 50 mGy cilvēkiem, kas oficiāli tika klasificēti kā neapstaroti. Turklāt EPR dozas atzīmē personām ar radiācijas ekspozīciju lielāku kā 250 mGy (profesionālās ekspozīcijas robeža avārijas situācijas laikā bijušajā PSRS).



6. attēls Oficiāli dokumentētas dozas un ar EPR metodi izmērītas dozas

Ar EPR metodi nomērītā doza ietver ekspozīciju no dažāda veida radioaktīvā starojuma - medicīniska, ārēja un iekšēja ekspozīcija, dabiskais radiācijas fons u.c.

Kalcija bagātu audu ⁹⁰Sr uzkrāšanas dozas noteikšana

Tika atrasta atšķirība ar faktoriem 2-5 starp oficiāli dokumentētām dozām un nomērītām ar EPR metodi. Tika ierosināts, ka liela daļa ekspozīcijas nāk no iekšējā starojuma.

Dažādas konceptuāli atšķirīgas metodes nosaka iekšējo dozu [17]. Viena no pieejām iekšējo dozu noteikšanai ir beta starojuma nuklīdu absorbētās dozas aproksimācijas aprēķināšana, kuras pamatā ir dotā

orgāna aktivitātes mērījumi. Metode aprēķina dozas līmeni specifiskajiem orgāniem, izmantojot beta starojuma nuklīdu vidējo enerģiju un tās aktivitāti orgānā. Dozas līmenis mGy/dienā ir aprēķināms pēc formulas [18]:

$$P(t) = C_0 \cdot 1.38 \cdot 10^{-2} \cdot E_{\beta} \cdot k, \quad (9)$$

kur C_0 - zobu emaljas specifiskā aktivitāte (Bq/g);

E_{β} — β -starojuma, ko izstaro $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, 1.09 MeV, vidējā enerģija;

K — daļa no β -starojuma enerģijas, kas ir absorbēta tieši zoba emaljā, 0.9. ^{90}Sr aktivitāte, kas ir izmērīta zoba emaljā 1997 gadā Černobiļas atomreaktora avārijas seku likvidētājiem, bija robežās no 20 Bq/g to 350 Bq/g [6, 19].

Izmantojot formulu (9) tika aprēķināts absorbētās dozas līmenis zoba emaljā Černobiļas atomreaktora avārijas seku likvidētājiem, kas bija robežās no 0.27 mGy/dienā līdz 4.7 mGy/dienā.

Ņemot vērā mīksto audu blīvumu ($\sim 1 \text{ g/cm}^3$) un kaulu blīvumu ($\sim 3 \text{ g/cm}^3$) maksimālais līmenis mīkstajos audos ir vienāds ar 3 mm un kaulos 1.2 mm. Tādēļ, varētu būt pieņemts, ka uzkrātais $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ apstaro kaulus un apkārtējos orgānus - kaula virsma, sarkanās un dzeltenās kaulu smadzenes.

^{90}Sr ir ļoti garš fizikāli-bioloģisks pussabrukšanas laiks un attiecīgi tādēļ tas turpina apstarot organismu daudzus gadus pēc uzkrāšanās organismā. Tādēļ EPR dozas ieguldījums, ņemot vērā šo faktoru, tikai ar laiku palielinās.

Kritisko orgānu daba un to beta starojuma jonizācijas blīvums varētu nopietni ietekmēt avārijas seku likvidētāju veselību, kā tas ir demonstrēts klīniskos pētījumos [13,14,15,16].

SECINĀJUMI

Tika sasniegti sekojoši rezultāti:

- Tika attīstīts cilvēka zobu emaljas EPR dozimetriskais signāls, lai mērītu uzkrātā jonizējošā starojuma dozas, kas absorbējas indivīda organismā;
- Tika izpētīta paraugu sagatavošanas tehnoloģijas ietekme uz EPR mērījumiem; izstrādāta tehnoloģija lielāka signāla/ trokšņu attiecības un fona signāla samazināšanai. Tika attīstītas rekomendācijas labākai paraugu tehnoloģijai;
- Tika izpētīta EPR mērījumu režīmu ietekme uz nosakāmo zobu emaljas signālu, tika optimizēta mikroviļņu jaudas, temperatūras reģistrācijas un spektra apstrādes procesa ietekme;
- Tika novērtēts EPR dozimetrijas kļūdu kopums cilvēka zobu emaljai; EPR metodes standarta kļūda ir zemāka kā 30% dozu diapazonā 100 - 500 mGy;
- Cilvēka zobu emaljas EPR dozimetrija tika pārbaudīta saskaņā ar starptautisko standartu. Tika veikta TLD sistēmas kalibrācija; šīs metodes kļūda ir robežās -30% - +50%, tika noteikta TLD metodes kombinētā standarta kļūda un tā ir 18 % 10 mSv dozai;
 1. Individuālo dozu mērījumi, izmantojot EPR metodi, variē robežās no 60 - 800 mGy. Ārējās ekspozīcijas dozas sakrīt ar oficiāli dokumentētu profesionālo dozu. 40-50% no kopējās ķermeņa dozas pārstāv iekšējais starojums
 2. Tika noteikts absorbētā nuklīda ⁹⁰Sr dozu līmenis un tas ir diapazonā 0.27 mGy/dienā - 4.7 mGy/dienā;

ATZINĪBA

Es esmu lielu pateicību parādā sava darba vadītājai, profesorei Ninai Mironovai-Ulmanei un zinātniskajam vadītājam, profesoram Jurijam Dehtjaram. Paldies par optimismu, par atbalstu, kā arī par zināšanām! Sirsnīgs un silts paldies par visu manai ģimenei un konkrēti manai sievai par stingru morālu palīdzību, par motivāciju nekad neapstāties. Paldies par sapratni!

Speciāls paldies Konstantīnam Bogučarskim par atsaucību un iespēju interpretēt viņa datus, kas izmantoti 36., 37. attēlos un par palīdzību TLD iegūto mērījumu kļūdas noteikšanā.

Milzīgs paldies RTU Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūta kolektīvam un speciāli Aleksejam Kataševam, Tatjanai Bogučarskai, Aldim Balodim par auglīgām diskusijām, draudzību un morālu atbalstu.

Sirsnīgs paldies Vinetai Zemītei par palīdzību tulkošanā un draudzību. Speciālu atzinību Genādijam Sagalovičam par viņa atbalstu un reālistisku skatu uz dzīvi.

Es vēlētos pateikties arī Uldim Ulmanim par palīdzību un personīgo piemēru, viņa pieredzi, gudrību un inteliģenci.

Un visbeidzot paldies kolēģiem no IAEA un speciāli Sergejam Fesenko, Staņislavam Vatņitskijam un Gustavo Massera par augsta līmeņa profesionālismu.

ATSAUCES

1. Bailiff, I. K. Retrospective dosimetry with ceramics, *Radiation Measurements*, 27(5-6), (1997) 923-941
2. Bruvere, R., Heisele, O., Zvagule, T., Curbakova, E. The immune state of Latvian inhabitants involved in the clean-up of radioactivity in Chernobyl. *Acta Medica Baltica*, 1 (1994) 30-37
3. International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115, Vienna (1996)
4. The International Commission on Radiological Protection. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: Part 1. ICRP Publication No 30. Vol. 2 (3/4) (1979) ISBN 0 08022638 8
5. Noteikumi par aizsardzību pret jonizējošo starojumu. Latvijas republikas ministru kabinets, Noteikumi nr.297, Latvijas vēstnesis, 1997.g,15 augusts. (in Latvian)
6. Mironova, N., Eglite, M., Churbakova, E., Zvagule, T., Riekstina, D. Electron Spin Resonance and Instrumental Neutron Activation Element analysis of Chernobyl nuclear power plant accident clean-up workers teeth. *Proc. Latvian. Acad. Sci., Section B*, 52 (1998) 194-196
7. Trokss, J., Rogulis, U., Tale, I. Radiometra PE-1306 pielietošana individuālai ESR dozimetrijai [Individual ESR dosimetry by use of the radiospectrometer PE-1306]. *Latv.J Physics Tech.Sci.*, 2 (1995) 30-34
8. World Health Organization. Health Consequences of the Chernobyl Accident. Results of IPHECA pilot projects and national programmes. Scientific Report, (1996) ISBN 5-88429-010-1
9. International Organization for Standardization. Guide to the expression of Uncertainty in measurements. ISO, Geneva, (1995) ISBN 92-67-10188-9
10. Nagy, V. Accuracy consideration in EPR dosimetry. *Appl. Rad. Isot.* 52(2000) 1039-1050

11. International Atomic Energy Agency. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water. Technical Reports Series 398, (2000) ISBN 92-0-102200-X
12. Wiesser, A., and all. The second international Intercomparison on EPR tooth dosimetry. Radiation Measurement. 32 (2000) 548-557.
13. Curbakova, E., Dzerve, B. and Eglite, M. Health status and follow-up of the Chernobyl NPP accident liquidators in Latvia. Proc. 1st Int. Conf. Rad. Conseq. Chernobyl. Ace, Minsk. Report Eur 16 544 (Brussels: European Commission), (1996) 929-934
14. Zvagule, T., Mironova-Ulmane, N., Pavlenko, A., Kartner, T., Bruvere, R., Garbuseva, N., Volrate, A. Retrospective Dosimetry and Clinical Follow-up program for Chernobyl Accident Clean-up workers in Latvia. Proc. IRPA Reg. Cong. Rad. Prot. CD-ROM 60-03 ISBN 953-96133-3-7 (2001)
15. Kurjane, N., Bruvere, R., Shitova, O., Romanova, T., Jaunalksne, I., Kirschfink, M. and Sochnevs, A. Analysis of the immune status in Latvian Chernobyl clean-up workers with non-oncological thyroid diseases. Scand. J. Immunol. 54 (2001) 528-533
16. Mironova-Ulmane, N., Pavlenko, A., Zvagule, T., Karner, T., Bruvere, R., and Volarte, A. Retrospective dosimetry for Latvian workers at Chernobyl. Radiation Protection Dosimetry. 96 (1-3) (2001) 237-240
17. US Department of Energy: DOE Standard, Internal Dosimetry. (1999) DOE-STD-1121-98
18. Ilin, N., Borisova, V., Vetluh, V. The remote biological effects of the combined action radionuclides. Energoatomizdat, Moskow, (1991) 160p. (in Russian)
19. Bruvere, R., Mironova-Ulmane, N., Feldmane, G., Volrate, A., Zvagule, T. (3-radioactivity of teeth and the ability of leukocytes to produce interferons in Chernobyl incident clean-up workers. Proc. VI Int. Conf. Med. Phys., Physica Medica. 15 (1999) 139