



УНУВЕРЗИТЕТ НОВИ САД
ПРИРОДНО МАТЕМАТИЧКИ ФАЛУЛТЕТ
ДЕПАРТМАН ЗА ФИЗИКУ



**Садржај произведеног радионуклида Cs-137 и
процена дозе ингестијом услед конзумирања
црвеног воћа увезеног из Европе**

Мастер рад

Ментор:
Проф др Наташа Тодоровић
Др Јелена Крнета Николић

Кандидат:
Јована Новаковић 180м/21

Нови Сад, 2023.

ЗАХВАЛНИЦА

Захваљујем се др Наташи Тодоровић и др Јелени Крнети Николић, као и осталим члановима комисије за сву помоћ, сугестије и примедбе и корисна запажања током израде рада.

Захваљујем се Институту за нуклеарне науке "Винча" за омогућен приступ материјалима у уређајима, који су омогућили реализацију овог рада.

Посебно се захваљујем породици и пријатељима за неизмерну подршку и стрпљење, коју су пружали.

Abstract

Ionizing radiation is a part of everyday life and is introduced into the body in different ways: by taking in the air, water and food in which can be found, as well as from the ground and buildings materials. It can ionize atoms that enter our cells, alter DNA and lead to cell death. As much as some doses can damage the body, it is not necessarily true that less radiation will lead to the same consequences.

Although certain countries, during the 20th century, did not have much contact with radiation, strictly speaking of nuclear tests and nuclear accidents, it does not necessarily mean that they are isolated from the radiation released in other countries. Radioactive particles travel through the air, are carried by the winds, settle in matter, which makes it contaminated. The import of foodstuffs from other countries enables the transport of radioactive foodstuffs.

Today, radioactive Cs-137 with a half-life of 30.18 years is found in nature as a fission product, consequence of the Chernobyl accident and nuclear tests. It is easily absorbed in matter and remains absorbed for a long time in the foods that are consumed.

This thesis presents an examination of the content of Cs-137 in imported red fruit from Europe and the safety of consumption. 1176 samples were tested at the Institute for Nuclear Sciences "Vinča" in the period from 2020 to 2022. The concentration of deposited Cs-137 was examined by gamma spectrometry. By using three of HPGe detectors for gamma spectrometry, measuring activity and annual intake, the results are as follows:

- Detected Cs-137 was found in 219 samples, of which 24 exceeded the reference level of activity prescribed by the Directorate for Radiation and Nuclear Safety and Security of Serbia, 2 reached the reference level, and the other 195 were below the reference level.
- The maximum dose that can be ingested by an adult is $149 \pm 14 \mu\text{Sv}/\text{year}$, and the minimum dose is $2 \pm 1 \mu\text{Sv}/\text{year}$.
- Given that there are samples containing Cs-137 concentration that exceeds the prescribed reference level, it is necessary to monitor imported foodstuffs.

Key words: radioactivity, cesium 137, biological effect on the organism, interaction of gamma rays with matter, semi conductor gamma detectors, detector characteristics, gamma spectrometry, HPGe, calibration, gamma spectrum

Сажетак

Јонизујуће зрачење је део свакодневног живота и уноси се у организам различитим путевима: удисањем ваздуха у којем се налази, уношењем хранљивих супстанца и воде у којима се депонује, земљи по којој газимо, таложи се у грађевинском материјалу. Са обзиром да такво зрачење јонизује материју, може јонизовати атоме који улазе у састав анатомије, мењати ДНК и узроковати ћелијску смрт. Колико год да неке дозе могу имати фаталне последице по организам, није нужно да ће мање зрачење довести до истих последица.

Иако поједине земље, током XX века, нису имале много контакта са радијацијом, уско говорећи о нуклеарним тестовима и нуклеарним акцидентима, не мора да значи да су изоловане од ослобођене радијације у другим земљама. Радиоактивне честице путују кроз ваздух, носе их ветрови, таложе се у материји, чиме она постаје контаминирана. Увоз намирница из других земаља омогућава транспорт радиоактивних намирница.

Као физиони производи као последица акцидента у Чернобилу и нуклеарних тестова у природи се данас налази радиоактивни Cs-137 са периодом полураспада од 30,18 год. Лако се апсорбује у материји и дуго опстаје тако апсорбован у намирницама које се конзумирају.

Овај рад представља испитивање садржаја Cs-137 у увезеном црвеном воћу из Европе и сигурност конзумирања. Испитано је 1109 узорак на Институту за нуклеарне науке "Винча" у периоду од 2020. године до 2022. године. Концентрација депонованог Cs-137 је испитана гама спектрометријом. Гама спектрометријом на три HPGe детектора, мерењем активности и годишњег уноса, резултати су следећи:

- Детектован Cs је нађен у 160 узорака, од којих 19 премашује референтни ниво активности прописан Директоратом за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије, 2 су достигла референтни ниво, а осталих 139 су испод референтног нивоа.
- Највећа доза коју може унети одрасла особа износи 149,46 $\mu\text{Sv}/\text{god}$, а минимална доза износи 1,21 $\mu\text{Sv}/\text{god}$.
- Са обзиром на то да постоје узорци који садрже концентрацију Cs-137 која премашује прописан референтни ниво, потребно је вршити мониторинг увезених намирница.

Кључне речи: радиоактивност, цезијум 137, биолошко дејство на организам, интеракција гама зрака са материјом, полупроводнички детектори зрачења, карактеристике детектора, гамаспектрометрија, HPGe, калибрација, гама спектар

Садржај

1	Увод	1
2	Радиоактивност	3
2.1	Природна радиоактивност	3
2.2	Активност и период полураспада	8
2.3	Бета (β) распад	10
2.3.1	Бета минус (β^-) распад	10
2.3.2	Бета плус (β^+) распад	10
2.3.3	Електронски (К) захват	11
2.4	Гама (γ) зрачење и интерна конверзија	11
3	Порекло Цезијума Cs-137	13
3.1	Цезијум у природи	13
3.2	Нуклеарна тестирања у бившем СССРу	13
3.2.1	Семипалатински полигон	14
3.2.2	Тестирања у Новој Земљи	18
3.2.3	Диспанзер бр. 4	23
3.3	Чернобилска експлозија	24
3.3.1	Радионуклиди пронађени у атмосферским аеросолима и узорцима земљишта након Чернобилске експлозије	27
4	Улазак радионуклида у ланац исхране	28
4.1	Природни радионуклиди	28
4.2	Вештачки створени радионуклиди	28
4.3	Пољопривредни фактори	31
4.4	Трансмисија путем животињског ткива	32
4.5	Контаминација у води	33
4.6	Информације о исхрани	34
4.7	Дозе и ризици од унесених радионуклида	35
4.8	Дозиметријске величине и јединице	36
4.9	Методологија одређивања ефективне дозе	38
4.10	Правилник о границама радиоактивне контаминације лица, радне и животне средине и начину спровођења деконтаминације	39
5	Законска регулатива	40

5.1	Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности	40
5.2	Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима	40
5.2.1	Врсте, начини и временски интервали мерења ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима	41
5.2.2	Границе излагања за становништво	41
6	Биолошко дејство на организам	44
6.1	Телијска смрт након озрачивања	46
6.2	Ефекти јонизујућег зрачења на људску популацију	46
7	Методe детекције зрачења и интеракција са материјом	48
7.1	Интеракције фотона са материјом	49
7.1.1	Фотоелектрични ефекат	49
7.1.2	Комптонов ефекат	50
7.1.3	Процес производње парова	51
7.2	Методe детекције гама зрачења	53
7.3	Полупроводнички детектори	54
7.4	Карактеристике детектованог спектра	57
7.4.1	Генерички одговор детектора	57
7.4.2	Карактеристике спектра	58
7.4.3	Резолуција детектора	60
7.4.4	Ефикасност детектора	61
7.5	HPGe детектори	62
7.5.1	Калибрација детектора	64
8	Анализа добијених резултата мерења	66
8.1	Формирање спектра и анализа спектра	66
8.2	Мерна несигурност	67
8.3	Рачунање активности и дозе	69
8.4	Резултати и дискусија	70
9	Закључак	78
10	Биографија	80
11	Референце	81

Садржај илустрација

Илустрација 2.1 Дмíтриј Ивáнович Менделéев	3
Илустрација 2.2 John Dalton (a), Joseph John Thomson (b) и Ernest Rutherford (c)	4
Илустрација 2.3 Niels Bohr (a), Erwin Schrodinger (b)	4
Илустрација 2.4 Wilhelm Konrad Rontgen (лево) и рендгенски снимак шаке његове супруге Берте (десно)	5
Илустрација 2.5 Antoine Henri Becquerel (лево) и развијена плоча са силулетом кристала (десно)	5
Илустрација 2.6 Pierre и Marie Curie	6
Илустрација 2.7 Шема експеримента Ernest Rutherford-a	7
Илустрација 2.8 Auger-ов ефекат (7)	12
Илустрација 3.1 Локација STS-a	14
Илустрација 3.2 Привремена мапа трагова падавина из атмосферских и земаљских тестова на полигону у близини Семипалатинска. Изодозне линије дају процењене кумулативне незаштићене спољашње дозе на тлу (15)	16
Илустрација 3.3 Локација првог подводног теста на NZTS	19
Илустрација 3.4 Подела NZTS-a по областима тестирања	20
Илустрација 3.5 Таложење Cs-137 у Украјни, Русији и Белорусији око места несреће	25
Илустрација 3.6 Таложење Cs-137 у Европи након несреће	26
Илустрација 4.1 Мерене активности радиоактивног цезијума у Немачкој након експлозије у Чернобилу (27)	29
Илустрација 6.1 Једноструки прекид ДНК ланца (лево) и двоструки прекид ДНК ланца (десно)	45
Илустрација 7.1 Могуће интеракције гама фотона са материјом приликом проласка кроз људски организам	48
Илустрација 7.2 Фотоефекат	49
Илустрација 7.3 Комптонов ефекат	51
Илустрација 7.4 Процес производње парова	52
Илустрација 7.5 График зависности интеракције фотона са материјом од атомског броја материје и енергије фотона	53
Илустрација 7.6 Шема полупроводничког детектора	54
Илустрација 7.7 Коаксијални отворени (a), коаксијални затворени (b) и планарни (c)	55

Илустрација 7.8 Погоршање гама спектра полупроводничког детектора високе резолуције са повећањем флуенса неутрона	56
Илустрација 7.9 Идеализован спектар фотона (а) произведен од слободних нуклеона, (b) произведен од слободних језгара и (c) произведен од интеракција у медијуму	58
Илустрација 7.10 Реалистичан приказ гама спектра моноенергетског извора гама зрака са наведеним карактеристикама спектра	60
Илустрација 7.11 Разлика пикова два енергетска спектра	61
Илустрација 7.12 Шема HPGe детектора	63
Илустрација 8.1 Изглед фотопкиа са степ континуумом	67

Садржај табела

Табела 2.1 Активности примењене у медицини и нуклеарној физици (1)	8
Табела 2.2 Примери радиоактивних изотопа нађених у природи (1)	8
Табела 3.1 Процене средњих доза спољашњег γ -зрачења за појединце у селима Долон, Черемушки и Мостик, у различито време након експлозије (први тест 29. августа 1949.) (15)	15
Табела 3.2 Процене средњих еквивалентних доза за појединце за одређене органе од уноса радионуклида храном и водом, у Долону, Черемушком и Мостику, у различито време након експлозије (први тест 29. августа 1949.) (15)	15
Табела 3.3 Подводни, надводни и површински нуклеарни тестови 1955-1962	21
Табела 3.4 Период ANT у NZTS	21
Табела 3.5 Јачине ANT у NZTS (Y представља принос експлозије)	21
Табела 3.6 Области са распрострањеним Cs-137 по km ²	26
Табела 4.1 Типична активност Cs—137 у разноликој храни након Чернобилске експлозије (27)	30
Табела 4.2 Очекиване ефективне дозе по јединичном уносу e(g) ингестијом [Sv/Bq] за становништво; g- старост f1- фракција стабилног елемента која доспева у телесне течности након уношења ингестијом	39
Табела 5.1 Вредности радијационих тежинских фактора (28)	42
Табела 5.2 Вредности ткивних тежинских фактора	43
Табела 8.1 Табела са измереним радиоцезијумом у боровницама	72
Табела 8.2 Табела са измереним радиоцезијумом у брусницама	77
Табела 8.3 Табела са измереним радиоцезијумом у купинама	77

1 Увод

На самом крају XIX века, физичари су дошли до првих открића радијације и радиоактивних елемената. Како није била истражена област, радијација је окупирала пажњу истраживања и доживела врхунац током 50-тих година XX века. На жалост, нико није био упознат са њеним дугорочним ефектима на живи свет. Приликом открића рендгенских зрака, становништво се добровољно пријављивало на третмане рендгенских зрака великих интензитета. Када су се појавили први штетни ефекти, научници су смањили беспотребну изложеност становника овом зрачењу. Открићем нових елемената, њиховим испитивањем, убацивањем у разне козметичке и друге препарате за свакодневну употребу, становници су поново били изложени штетним ефектима овог процеса. Закључно са пријавом великог броја обољења након излагања радиоактивним елементима, надлежни органи су забранили цивилима употребу ових препарата, а неке лабораторије су затворене и данас. Но, то није спречило даље испитивање радиоактивних елемената и проналазака њихове примене.

У следећој етапи испитивања радијације, атома и њихових језгара, главни фокус је био на нуклеарном наоружању и нуклеарним електранама, како су налагале прилике Другог светског рата. У такмичењу за напредније и деструктивније оружје, научници и инжењери су конструисали прву нуклеарну бомбу, чија је деструктивна моћ демонстрирана на Јапану. Увидевши размере катастрофе коју је задесила Јапан, велике силе су наставиле испитивања нуклеарног наоружања, као и конструисање нуклеарних електрана. Конструисање разних полигона за испитивање оружја, као и поједине несреће, довеле су до ослобађања у животну околину великих количина радиоактивног материјала током друге половине XX века. Услед кретања великих ваздушних и водених маса овај материјал се проширио преко целе планете.

Данас се са радиоактивношћу срећемо на сваком кораку, у медицини, води, храни, земљи, па и ваздуху који удишемо. Поједине дозе радијације са којима се сусрећемо могу бити штетне, у неким случајевима и фаталне, док су неке дозе неприметне. Разни институти широм света константно мере дозе зрачења у различитим узорцима. Испитује се врста зрачења, доза којој је живи свет изложен, апсорбована доза, начин уноса штетног материјала итд. како би зауставили или сузбили нежељени ефекти изложености јонизујућем зрачењу.

Један од примера испитивања је представљен у овом раду. Конкретно, ради се о контроли хране која се увози у Србију. Приликом увоза укупне количине робе (у овом случају, црвеног воћа из Европе), узима се одређена количина- узорак и шаље на Институт

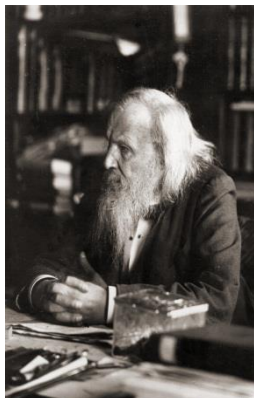
за нуклеарну физику „Винча“. На пристиглој количини треба испитати садржај радиоактивног цезијума Cs-137. Под условом да се установи садржај радиоактивног материјала, потребно је испитати његове дозе и количине у одређеним узорцима. С обзиром да је увезена количина доступна широком тржишту, тј. јавности, даље истраживање ће захтевати процену уноса путем исхране. Када се одређена количина радиоактивног материјала нађе у ораганизму, потребно је знати апсорбовану дозу цезијума, као и ефекте које апсорбовање ове дозе може изазвати.

2 Радиоактивност

2.1 Природна радиоактивност

Од давнина је познато да се свет састоји из атома, најмање јединице материје која формира хемијски елемент. Атоми се састоје од омотача у којем се налазе електрони, негативно наелектисане честице и језгра у којем се налазе протони и неутрони (једним именом нуклеони), позитивно наелектисане честице и неутралне честице, респективно. Атоми су дефинисани атомским бројем Z , бројем електрона у атому, и масеним бројем A , укупним бројем нуклеона. Користећи атомски број Z , Дмíтриј Ивáнович Менделеев¹ (илустрација 2.1) је направио периодни систем елемената. Ван овог система, постоје атоми истих атомских Z , али различитих масених бројева A , значи да се међусобно разликују по структури језгра. Такви атоми се називају изотопи (1).

Језгра атома могу бити у разним енергетским стањима. Она језгра која имају минималну енергију, су у основном стању и таква језгра називамо стабилна језгра. Сва друга језгра се налазе у побућеним стањима и она се називају нестабилна језгра. Нестабилна језгра су подложна распаду, емитовањем електромагнетног зрачења, или честица како би се ослободила вишка енергије и дошла у основно стање, чиме постају стабилна. Многи изотопи садрже нестабилна језгра (1).



Илустрација 2.1 Дмíтриј Ивáнович Менделеев

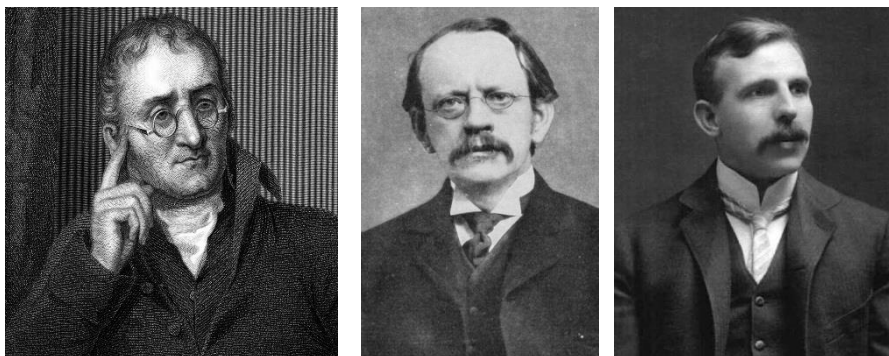
Дуго се радило на поставци модела и изучавању атома. Еволуција ових знања је почела од John Dalton-а² (илустрација 2.2.a) и Joseph John Thomson-овог³ (илустрација 2.2.b)

1 Дмíтриј Ивáнович Менделеев (8. фебруар 1834.- 2. фебруар 1907.) (2)

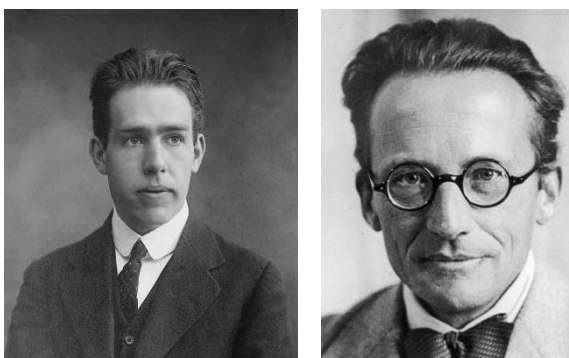
2 John Dalton (6. септембар 1766.- 27. јул 1844.) (38)

3 Joseph John Thomson (18. децембар 1856-30. август 1940.) (39)

модела пудинга са шљивама до планетарног модела, свима познатим Ernest Rutherford-a⁴ (илустрација 2.2.с), који су модификовали Niels Bohr⁵ (илустрација 2.3.а) и Erwin Schrodinger⁶ (илустрација 2.3.б) током XX века. Пре њих, атом је свету био познат само као мала, невидљива и недељива материја која се не може уништити, нити створити (1).



Илустрација 2.2 John Dalton (а), Joseph John Thomson (б) и Ernest Rutherford (с)



Илустрација 2.3 Niels Bohr (а), Erwin Schrodinger (б)

Атомска и нуклеарна физика доживеле су процват током XX века, а све је почело када је Wilhelm Konrad Rontgen⁷ (илустрација 2.4) открио рендгенске (X) зраке новембра 1895. године. Радећи у својој лабораторији, приметио је да када постави непрозиран црни заклон на катодној цеви, појавиће се зелено флуоресцентно⁸ светло на платинобаријумском екрану удаљеном иза екрана. Дошао је до закључка да су флуоресценцију изазвали зраци, настали у катодној цеви, а како тада није знао ништа више о њима, назвао их је икс (X) зраци. Убрзо је откривено да зраци пенетрирају кроз многе супстанце, па и кроз људско тело, уз то да кости и метале оставља видљивим. Један од првих снимака ренгенским зрацима, је шака са

4 Ernest Rutherford (30. август 1871.-19. октобар 1937.) (40)

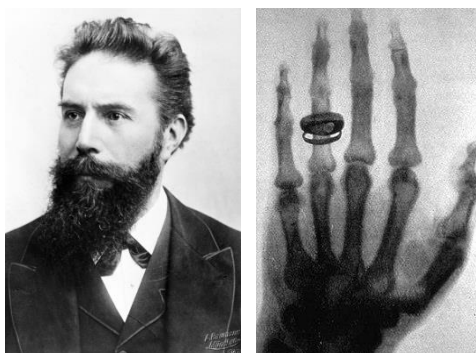
5 Niels Bohr (7. октобар 1885.-18. новембар 1962.) (41)

6 Erwin Schrodinger (12. август 1887.- 4. јануар 1961.) (42)

7 Wilhelm Konrad Rontgen (27. март 1845.-10. фебруар 1923.) (43)

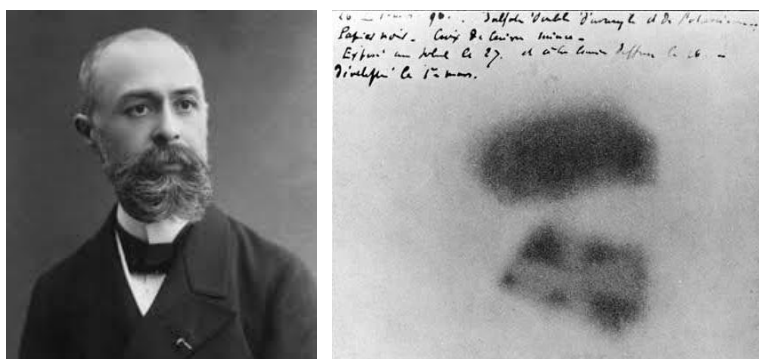
8 Флуоресценција је светлост коју емитује атом или молекул након апсорбовања електромагнетног таласа.(44)

бурмом његове супруге Берте (илустрација 2.4). За ово откриће добио је Нобелову награду 1901. године (1).



Илустрација 2.4 Wilhelm Konrad Röntgen (лево) и рендгенски снимак шаке његове супруге Берте (десно)

Како се бавио испитивањем фосфоресценције⁹ и апсорпцијом светлости у кристалима, Antoine Henri Becquerel¹⁰ (илустрација 2.5), наставља испитивање Röntgen-ових зрака марта 1896. године. Испитивање је вршио коришћењем гасне катодне цеви, сличне катодној цеви коју је користио Röntgen.



Илустрација 2.5 Antoine Henri Becquerel (лево) и развијена плоча са силулетом кристала (десно)

Желео је да одреди повезаност флуоресценције на стаклу цеви и фосфоресценције одређених соли, када су соли изложене сунчевој светлости. Једна од соли коју је користио, била је калијум уранил сулфат $[SO_4(UO)K \cdot H_2O]$. Обмотао је фотографску плочу дебелим, црним папиром, поставио је со на плочу и изложио сунчевој светлости. Када је развио плочу, угледао је силулету кристала на негативу. При многим експериментима је постављао разне материјале између кристала и фотографске плоче, али је увек при развијању снимка угледао силулету кристала. Појаву силулета је образложио као последицу способности материјала, постављеног између соли и плоче, да апсорбује зрачење које долази од соли.

⁹ Фосфоресценција је емисија светлости из супстанце изложене зрачењу и траје након што је извор зрачења уклоњен. (45)

¹⁰ Antoine Henri Becquerel (15. децембар 1852.- 25. август 1908.) (5)

При последњем експерименту, со није излагао светлости, јер је желео да одреди, да ли сама со зрачи, ако нема спољашњег извора зрачења. За овај експеримент, направио је непрозирну кутију на чијем је дну била фотографска плоча. У једном делу експеримента постављао је со директно на плочу, док је у другом делу постављао алуминијумски заклона између соли и плоче. При развијању снимка, угледао је силулете кристала (илустрација 2.5, десно), с тим да је силуета направљена са алуминијумским заклоном била слабија, због апсорпције. Из овога Becquerel је закључио да зрачење, или радијација, потиче од саме соли, без икаквог спољног утицаја (2).

Најважније откривено својство радијације јесте да изазива електрично пражњење наелектрисаних тела. Ово је преусмерило истраживање радијације путем јонизационих комора, чиме су се бавили Pierre¹¹ и Marie Curie¹² (илустрација 2.6) (1).



Илустрација 2.6 Pierre и Marie Curie

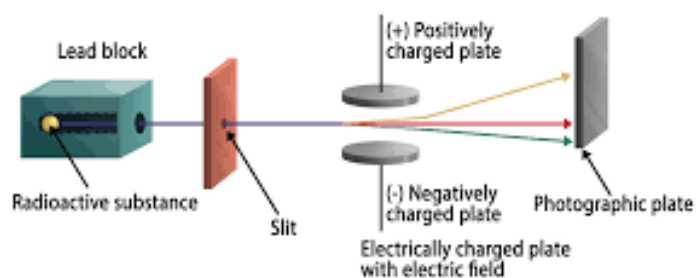
Коришћењем овог метода Marie Curie је обавила квантитативна мерења активности уранијумских соли и показала да је активност директно пропорционална маси уранијума, долазећи до закључка да је радиоактивност атомски феномен. Хемијском анализом уранијум оскида 1898. године открили су два нова радиоактивна елемента, полонијум (Po) и радијум (Ra). Becquerel, Pierre и Marie Curie добили су Нобелову награду за физику 1903. године за откриће радиоактивности (3–5).

Узимајући као темељ њихов рад, Ernest Rutherford је извео одлучујуће експерименте који су формирали модерну слику структуре атома. Радећи у лабораторији Joseph John Thomson-а, показао је да једињења уранијума (U) емитују најмање две дискретне врсте зрачења (илустрација 2.7). Једна врста зрачења се састојала од позитивно наелектрисаних честица, масивнијих од електрона и лако апсорбованих у материји. Како су ово прве

11 Pierre Curie (15. мај 1859.- 19.април 1906.) (3)

12 Marie Curie (7. новемар 1867.- 4.јул 1934) (4)

откривене честице назвао их је алфа (α) зраци¹³. Друга врста честица, названих бета (β) зраци¹⁴, је била истих маса и наелектрисања као и Thomson-ови електрони, само бржи. Током каснијих истраживања, открили су и трећу врсту зрачења, коју су назвали гама (γ)¹⁵ зраци. Поставио је радиоактивни елемент у оловну комору са отвором. Кроз отвор је пуштено зрачење, потекло од радиоактивног елемента, које је пролазило кроз магнет, постављен нормално на раван простирања зрака. На фотоплочи постављеној иза магнета издвоје се три врсте дискретних зрака (1). Скретањем на доле под малим углом у односу на правац простирања зрака, узроковано магнетним пољем, издвојени су α зраци. Негативан пол магнета узроковао је скретање позитивно наелектрисаних честица, а пошто су честице масивне у односу на електроне, скренуле су под малим углом. Скретањем на горе у односу на правац простирања таласа, под већим углом, издвојени су β зраци. Како су β зраци брзи електрони, скретање је изазвало позитиван пол магнета, а како су електронски лаке честице скретање је било под углом већим од 90° , што значи да су се честице враћале. Трећи снап који се издвојио на фотоплочи је наставио правац простирања. Ово су γ зраци, а како они не носе никакво наелектрисање, потпуно су индиферентни у односу на магнетно поље. Како су ови зраци потекли од самог језгра атома, показано је да је радиоактивност нуклеарни, а не атомски процес (1).



Илустрација 2.7 Шема експеримента Ernest Rutherford-a

Радиоактивност је процес спонтаног распада језгра уз емисију једне или више честица. Постоји више процеса који се убрајају у ову групу: α распад, β распад, γ зрачење, протонска и неутронска активност, спонтана фисија тешких језгара и фузија (1).

¹³ Алфа зраци, или алфа честице су позитивно наелектрисана честица, идентична језгру атома хелијума He.(46)

¹⁴ Бета честица, електрон (јединично негативно наелектрисање) или позитрон (јединично позитивно наелектрисање) које спонтано емитују одређена нестабилна атомска језгра у процесу бета распада. (47)

¹⁵ Гама зраци су део електромагнетног спектра најкраће таласне дужине и највеће енергије. (48)

Како је у овом раду представљено дејство радиоактивног цезијума Cs-137, који је бета и гама емитер, у раду ће бити објашњени процеси бета распада и гама зрачења.

2.2 Активност и период полураспада

Брзина којом се распадају радиоактивна језгра, са мањим изузецима не зависи од хемијских услова и у општем случају не може се предвидети колико ће времена бити потребно језгру да се распадне. Оно што је могуће предвидети јесте да ће се одређен број атома распасти у одређеном интервалу(1). Ако се у узорку налази број атома N , са вероватноћом распада у јединици времена λ димензија $\frac{1}{s}$, може се дефинисати активност неког елемента релацијом:

$$A = \lambda t \quad \text{Релација 2.1}$$

где је A активност радиоактивног елемента, тј. број распада у јединици времена. Јединица за активност је Becquerel [Bq] и износи $\frac{1}{s}$, где 1 Bq дефинише један распад у једној секунди.

Како су ово мале вредности радиоактивности, у примењеној нуклеарној и медицинској физици користе се далеко веће вредности приказане у табели (табела 2.1) (1). Многи изотопи познатих елемената који се налазе у природи су радиоактивни (табела 2.2).

Активности	Активности	Примена
MBq	10^6 Bq	Дијагностичка активност
GBq	10^9 Bq	Терапијска активност
TBq	10^{12} Bq	Нуклеарни реактори
EBq	10^{18} Bq	Нуклеарни реактори

Табела 2.1 Активности примењене у медицини и нуклеарној физици (1)

Радиоактивни изотоп	Количина радиоактивног изотопа	Налазишта у природи
U-238	30-40 Bq/kg	Земљиште
Ra-226	400 Bq/kg	
K-40	67,6 Bq/kg	Дрво
K-40	0,1 Bq/l	Вода

Табела 2.2 Примери радиоактивних изотопа нађених у природи (1)

Претпоставимо да у почетном тренутку t_0 дати узорак садржи N_0 атома. У процесу распадања језгра, у неком тренутку након времена t узорак ће имати $N(t)$ атома. Промена броја атома dN у јединици времена се може приказати релацијом:

$$dN = \lambda N dt \quad \text{Релација 2.2}$$

где је показано да је промена броја атома dN пропорционална временском интервалу распадања dt . Распадањем језгара у узорку, број атома одређеног елемента се смањује, а распад сваког језгра је дефинисан константом радиоактивног распада λ , релација 2.2 имаће облик:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \text{Релација 2.3}$$

где знак минус показује да се број језгра у току времена смањује. Даљим решавањем диференцијалне једначине добијамо:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Релација 2.4}$$

где је N_0 број језгара у почетном тренутку $t=0$, $N(t)$ број опсталих језгара након протеклог времена t , а λ је константа радиоактивног распада. Гледајући релацију 2.4, може се закључити да ће се број језгара радиоактивног елемента смањивати експоненцијално у току времена. Половина материјала ће се распасти у току времена T , назвним период полураспада, који се може одредити поставкама:

$$N = \frac{N_0}{2}$$

$$t = T$$

у релацији 2.4. Тада се добија:

$$N(t) = N_0 * 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad \text{Релација 2.5}$$

На крају једног периода полураспада, опстаће једна половина броја језгара оригиналног радиоактивног материјала, на крају два периода полураспада опстаће једна четвртина оригиналног материјала итд (1).

Периоди полураспада су познати за многе елементе и варирају од елемента до елемента.

Ако израз за број атома $N(t)$ из релације 2.4, вратимо у релацију 2.2, добијамо:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Релација 2.6}$$

где је A_0 почетна активност броја језгара N_0 у тренутку $t=0$, одакле се види да се активност временом смањује (1).

2.3 Бета (β) распад

Постоје три облика β распада:

1. Бета минус (емисија електрона);
2. Бета плус (емисија позотрона);
3. Електронски (К) захват.

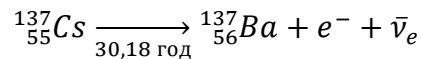
2.3.1 Бета минус (β^-) распад

Током β^- распада, у језгру родитељског језгра, неутрон се трансформише у протон, при чему се емитију електрон и електронски антинеутрино. Дакле, атомски број атома потомка се повећава за један, а масени број остаје исти, што се може видети у следећим релацијама:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad \text{Релација 2.7 (1)}$$

$${}^A_Z P \rightarrow {}^A_{Z+1} D + e^- + \bar{\nu}_e \quad \text{Релација 2.8}$$

Типичан пример бета минус распада је распад језгра цезијума Cs-137 са полураспадом 30,18 година на никл Ва-137 (6):



2.3.2 Бета плус (β^+) распад

Током β^+ распада, у језгру родитеља, протон се трансформише у неутрон, а емитију се позитрон и неутрино електронски. Дакле, атомски број, језгра родитеља се смањује за један, а масени број остаје исти, што је приказано релацијама (1):

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad \text{Релација 2.9}$$

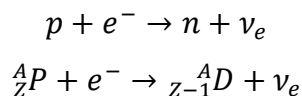
$${}^A_Z P \rightarrow {}^A_{Z-1} D + e^+ + \nu_e \quad \text{Релација 2.10}$$

Радионуклиди који подлежу бета плус распаду се често називају позитрон емитери. Велику примену имају у медицини при коришћењу PET¹⁶ скенера.

¹⁶ Positron emission tomography

2.3.3 Електронски (К) захват

К захват се одвија када се електрон нађе у језгу атома. Тада протон захвата електрон, заједно се трансформишу у неутрон, при чему се емитије неутрино електронски. Због ове трансформације, атомски број се смањује за један, док масени број остаје исти, што је приказано следећим релацијама (1):



2.4 Гама (γ) зрачење и интерна конверзија

Алфа и бета зрачењем могу да настану језгра потомци која се такође налазе у нестабилном стању. Ово се дешава зато што није дошло до потпуног утrophка енергије током распада, па је део енергије остао у језгру потомку (изомерно нестабилно стање) (1). Ново језго тежи да буде у стању са минимумом енергије, и то постиже на два начина:

1. Емисијом гама зрачења- емитовањем енергије у форми једног или више гама фотона током процеса распада;
2. Интерном конверзијом- избацавањем једног електрона из унутрашњих орбитала. Шупљина која остаје, бива попуњена другим електронима са виших орбитала, резултујући карактеристичним X зрацима и/или Auger-овим електронима (1).

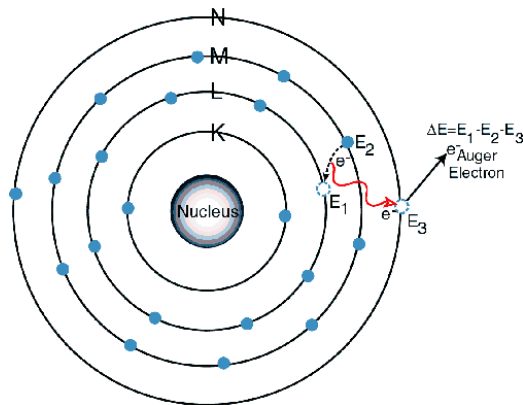
У већини случајева, алфа и бета распада, деексцитација језгра потомка се дешава моментално ($\sim 10^{-2}$ s), тако да се сматра да је емитовано гама зрачење пореклом језгра родитеља (1).

Гама зрачење језгара се описује следећом релацијом:



Спектар гама зрачења је дискретан, језгра емитију гама зрачење тачно одређене енергије (1).

Унутрашња, интерна, конверзија је слична фотоэффекту (погледати поглавље 7.1.1). Побуђено језгро има вишак енергије, које мора да се ослободи. Када језгро емитује гамаквант, тај гама квант може да се преда електрону у унутрашњој орбитали. Сада тај електрон има вишу енергију од оне коју захтева орбитала и он бива емитован из атома. На месту тог електрона се налази шупљина коју ће попунити електрон са више орбитале, при чему се емитују карактеристични X зраци (илустрација 2.9).



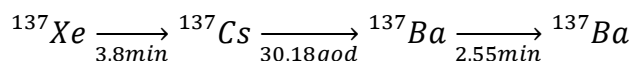
Илустрација 2.8 Auger-ов ефекат (7)

3 Порекло Цезијума Cs-137

3.1 Цезијум у природи

Цезијум је мекан, флексибилан, сребрно-бели метал који постаје течан на собној температури. Лако се везује за хлориде и гради кристални прах. Најраспрострањенија форма цезијума је радиоактивни цезијум, Cs-137, који је продукт нуклеарне фисије и користи се за процесе у нуклеарним електранама и у нуклеарном наоружању. Пошто се лако везује са хлоридима, у природној средини реагује попут кухињке соли. Лако се креће кроз ваздух, лако се раствара у води, снажно се везује за тло и бетон, али не продире дубоко у тло, а биљке које расту у или у близини контаминираног земљишта могу да садрже мале количине Cs-137 из тла. Период полураспада је 30,18 година. (8,9) .

Како је цезијум 137 радиоактиван елемент, он се бета минус распадом, распада до баријума по следећој релацији:



3.2 Нуклеарна тестирања у бившем СССРу

У деценији пре Другог светског рата, совјетски физичари су се активно бавили нуклеарним и атомским истраживањима. До 1939. су установили да, када језгро уранијума доживи фисију, свако језгро емитује неутроне и стога може, барем у теорији, започети ланчану реакцију. Следеће године, физичари су закључили да се таква ланчана реакција може одвијати или у природном уранијуму или у његовом изотопу U-235 и да се ова реакција може одржати и контролисати. У јулу 1940. Совјетска академија наука је основала Комисију за Уранијум за проучавање „проблема уранијума“, а Стаљин¹⁷ је 1943. године наредио да се отпочне истраживачки пројекат под надзором Игорњ Василјевич Курчатов¹⁸, који основа Лабораторију бр. 2¹⁹ за спровођење новог програма (10).

Демонстрирање нуклеарног наоружања на Јапану, довело је СССР до оснивања новог програма, који ће резултирати совјетским нуклеарним наоружањем. Крајем августа 1945. године, образује се Специјални комитет, којим је председавао Лаврентиј Павлович Берија²⁰.

¹⁷ Иосиф Сталин (3.4.1922 – 16.10.1952) (49)

¹⁸ Директор лабораторије за нуклеарну физику на Физичко-техничком институту Академије наука у Лењинграду (12.1.1903- 7.2.1960) (50)

¹⁹ После рата је преименована у Лабораторију мерних уређаја Академије наука, а потом је постала Руски истраживачки центар Курчатов институт (10)

²⁰ Лаврентиј Павлович Берија (29.3.1899-23.12.1953)

После Другог светског рата, главни нуклеарни програми Совјетског Савеза за развој оружја резултирао је првим нуклеарним уређајем у тој земљи, названом РДС-1²¹. Први пут је тестиран у Казахстану 29. августа 1949, на ономе што је постало познато као Семипалатински полигон (STS²²).

3.2.1 Семипалатински полигон

Радови на изградњи првог полигона за нуклеарно тестирање почели су након Уредбе Савета министара од 19. јуна 1947. На североисточном крају будућег полигона у централноазијским степским областима западно од Семипалатинска, изграђен је затворени град за истраживање нуклеарног оружја, Курчатов²³. Место теста (полигон) обухватало је подручје од приближно 19.000 km² западно од града Семипалатинска (сада: Семей), који се налази у североисточном делу Казахстана. Спроведено је 456 нуклеарних тестова (616 нуклеарних уређаја) између 1949. и 1989. (11–14) .



Илустрација 3.1 Локација STS-а

Први нуклеарни тест је извршен 29. августа 1949. године, у 7.00 часова, на STS у СССР-у. Експлозија се догодила на висини од 30 m изнад земље уз ослобађање енергије од 22 000 метричких тона TNT-а²⁴. Брзина ветра у време тестирања била је 45–50 km/h, а у року од 2 h, радиоактивни облак је стигао до густо насељених области унутар радијуса од 100 km од хипоцентра. Због насталих радиоактивних падавина, почетне брзине дозе на нивоу тла у неким насељеним подручјима су милионима пута премашиле природни ниво. Радиоактивним падавинама захваћене су територије удаљене и до 2000 km од хипоцентра експлозије. Око 500 000 људи било је изложено значајним дозама јонизујућег зрачења. Нису предузете никакве мере радијационе безбедности (нпр. евакуација или поправне мере),

²¹ „Россия Делает Сама“, што значи „Русија ради сама“

²² STS „Semipalatinsk Test Site“

²³ Град Курчатов се није појавио на мапама осим железничке станице под називом „конечнаја“ (терминал).

²⁴ Тринитротолуена

пошто су испитивања спроведена у строго поверљивим условима. Табела 3.1 приказује дозе екстерних γ и рендгенских зрака за појединце у неким селима северозападно од места тестирања. Због доминације краткоживећих радионуклида за ефекте атмосферских експлозија у близини места, становништво је примило 64% укупне (акумулиране) дозе током прве недеље и око 85% током прва 3 месеца након експлозије. У табели 3.2 приказане су интерне еквивалентне дозе појединаца за одређене органе у вези са уносом радионуклида храном и водом. Дозе штитне жлезде услед уноса јода биле су веома значајне, посебно за децу (15).

Спољашња доза радијације (mSv)						
Време након експлозије	1 дан	7 дана	30 дана	90 дана	365 дана	Акумулирана доза
Доза без заштите	810	1300	1600	1700	1900	2000
Доза са заштитом	600	960	1200	1300	1400	1600

Табела 3.1 Процене средњих доза спољашњег γ -зрачења за појединце у селима Долон, Черемушки и Мостик, у различито време након експлозије (први тест 29. августа 1949.) (15)

Интерна доза органа (mSv)					
Време након експлозије	7 дана	30 дана	90 дана	365 дана	50 година
Тироидна жлезда:					
Одрасли	620	1100	1300	1300	1300
Деца	3100-6200	5500-11 000	6500-13 000	6500-13 000	6500-13 000
Дигестивни тракт					
Коштана срж	30	50	70	90	90

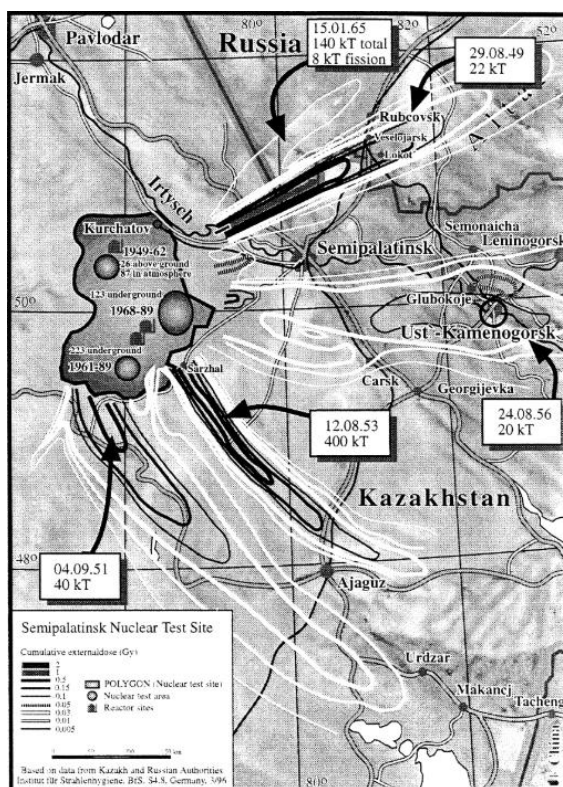
Табела 3.2 Процене средњих еквивалентних доза за појединце за одређене органе од уноса радионуклида храном и водом, у Долону, Черемушком и Мостику, у различито време након експлозије (први тест 29. августа 1949.) (15)

Током читавог периода нуклеарних проба у STS, односно од 1949. до 1989. године, становништво Семипалатинске области је било изложено јонизујућем зрачењу. Неких 6 површинских и 15 подземних експлозија сматрају се одговорним за њихову велику

изложеност. Међутим, најкритичнији доприноси дози су углавном резултат следећа четири површинска испитивања (Илустрација 3.2):

1. 29. августа 1949. (22 000 тона TNT-а);
2. 24. септембра 1951 (38 000 тона TNT-а);
3. 12. августа, 1953. (470 000 тона TNT-а);
4. 24. августа 1956 (26 500 тона TNT-а).

На основу анализе података, ове експлозије су изазвале 85% колективне ефективне дозе. (15)



Илустрација 3.2 Привремена мапа трагова падавина из атмосферских и земаљских тестова на полигону у близини Семипалатинска. Изодозне линије дају процењене кумулативне незаштићене спољашње дозе на тлу (15)

Већина тестова је обављена у касним летњим сезонама жетве, при чему је скоро целокупно одрасло становништво руралних подручја радило на пољима. Спољна експозиција за овај део популације може се, дакле, сматрати скоро једнаком дози у слободном ваздуху.

Прво тестирање водоничне бомбе извршено је 12. августа 1953. године у СССР-у на висини од 1000 м и са приносом од 470 000 метричких тона TNT-а, при чему је брзина ветра у то време износила 80–85 km/h. Временски услови – јак ветар, ниска облачност и киша – појачали су радиолошки ризик за становништво. До 1,2h након експлозије, акумулирана

изложеност достигла је 1800R у селу Таилан, које се налази 100km удаљено од хипоцентра експлозије, које је евакуисано пре теста хидрогенске бомбе. Коначно, ефикаснија двостепена нуклеарна конфигурација која користи компресију зрачења (аналогно Теллер-Уламовом дизајну) је детонирана 22. новембра 1955. Позната на Западу као Јо-19 и РДС-37 у Совјетском Савезу, термонуклеарна бомба је бачена са бомбардера на полигону Семипалатинск (сада Семеј, Казахстан) (10,11,15).

Наставак тестирања атомских, а затим и водоничних бомби доводи до све веће забринутости у вези са ефектима радиоактивних падавина. Како се знање о природи и ефектима падавина повећавало и како је постало очигледно да ниједан регион на свету није био нетакнут радиоактивним остацима, питање континуираних нуклеарних тестова привукло је све већу и интензивiranу пажњу јавности. Изражена је брига због могућности кумулативне контаминације животне средине и насталог генетског оштећења. Напори да се преговара о међународном споразуму о окончању нуклеарних проба почели су у Подкомитету пет (САД, Уједињено Краљевство, Канада, Француска и Совјетски Савез) Комисије за разоружање Уједињених нација у мају 1955. Јавни интереси у току преговора су били активни и упорни. Уговор о забрани тестирања²⁵ потписан је у Москви 5. августа 1963, ратификован од стране Сената Сједињених Држава 24. септембра 1963, и ступио је на снагу 10. октобра 1963. Уговором је забрањено тестирање нуклеарног оружја „или било које друге нуклеарне експлозије“ у атмосфери, свемиру и под водом. Иако није забрањивао испитивања под земљом, споразум је забрањивао такве експлозије, ако би изазвале „присуство радиоактивних остатака ван територијалних граница државе под чијом јурисдикцијом или контролом“ су експлозије спроведене. Прихватајући ограничења тестирања, нуклеарне силе су прихватиле као заједнички циљ „престанак контаминације човекове околине радиоактивним супстанцама“ (16–20).

Све до средине 1950-их, сва совјетска нуклеарна тестирања вршена су изнад земље у СТС. Али 1954. године први совјетски нуклеарни торпедо (противбродско оружје Т-5) је било у развоју и убрзо је постало спремно за тестирање. Совјетска војска је била жељна да га тестира у реалистичнијој ситуацији, захтевајући локацију близу морске обале, а Нова земља је у то време изабрана за оно што је постало први подводни тест у том региону 21. септембра 1955. године. Нуклеарна тестирања настављена у Казахстану, укључујући атмосферски тест са приносом од око 1,6 мегатона 22. новембра 1955. године, који је

²⁵ Limited Test Ban Treaty (LTBT) (18)

резултирао значајним радиоактивним падавинама у источном Казахстану и западном Сибиру, и детекцијом значајних радиоактивних остатака на истоку до Јапана (11,12,19,21).

3.2.2 Тестирања у Новој Земљи

На Новој земљи, извршено је укупно 130 тестова високо у атмосфери, на ниским нивоима изнад воде, на граници вода/ваздух, испод воде и под земљом. Ових 130 тестова укључивало је 224 одвојене експлозивне направе, укључујући далеко највеће атмосферске и подземне тестове у Совјетском Савезу, и једина тестирања те земље изнад и испод воде. Око 265 мегатона нуклеарне експлозивне енергије ослобођено је у Новој земљи од 1955. до 1990. године, у неким од најекстремнијих окружења које се могу наћи било где на Земљи. Контаминација радионуклидима је очигледна на неким локацијама данас (19).

Године 1954, падавине из америчког теста од 15 мегатона „BRAVO“ контаминирале су јапански рибарски чамац, узрокујући смрт једног човека и озбиљну болест неколико других. Тако је совјетским лидерима постало јасно да STS није погодан за велика атмосферска испитивања. Након процене алтернативних локација у лето 1957, Нова земља је изабрана као место за атмосферске тестове са више мегатона, као и за тестове под водом — упркос тешком окружењу далеко изнад арктичког круга и близини руског копна и Европе. Осамдесет пет атмосферских нуклеарних тестова²⁶ (ANT) званично је наведено да су се десила у Новој земљи од првог 24. септембра 1957. до последњег 25. децембра 1962. На крају је и ова локација коришћена, након Уговора о ограниченој забрани тестирања од 1963, за највеће подземне нуклеарне тестове²⁷ (UNT) у Совјетском Савезу, који су достигли врхунац у раним 1970-им пре ограничења наметнутих у марту 1976. Уговором о граничној забрани тестирања²⁸ (19).

Прва фаза изградње полигона почела је у октобру 1954. године. Главни циљ је био изградња пратећих објеката неопходних за извођење првог совјетског подводног теста. Главно место за ову прву фазу изградње била је Губа Черна. У неким годинама, дебљина морског леденог покривача достигала је до 13m у овом региону до краја зиме. Из тог разлога је ледоломац Бајкал предат NZTS-у²⁹ у марту 1958. године, како би се успоставила целогодишња веза између различитих делова полигона и копна. Главна лука за снабдевање операција тестирања био је Архангелск. Пароброд Емба је такође додељен полигону и

²⁶ Atmospheric nuclear tests

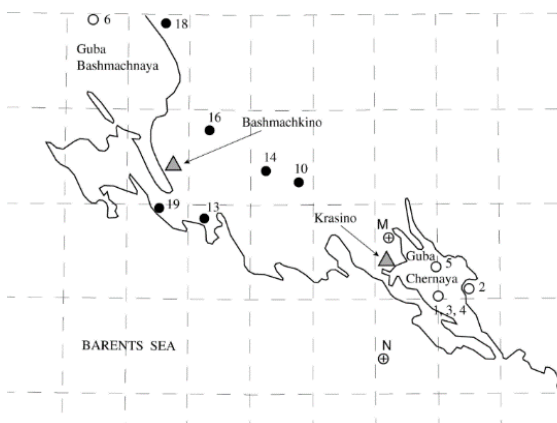
²⁷ Underground nuclear tests

²⁸ Threshold Test Ban Treaty (17)

²⁹ Novaya Zemlya Test Site (NZTS)

поново опремљен у командни центар за даљинско управљање нуклеарним уређајима. Подаци о резултатима испитивања прикупљани су на Ембу. Брод је био усидрен на позицији означеној словом „N” (Илустрација 3.3) 8km југозападно од места у Губи Черна где је требало да се изврши подводна експлозија (19).

Као резултат ове интензивне активности у којој је учествовало неколико хиљада војника и официра, први подводни нуклеарни тест СССР-а извршен је 21. септембра 1955 (19).



Илустрација 3.3 Локација првог подводног теста на NZTS

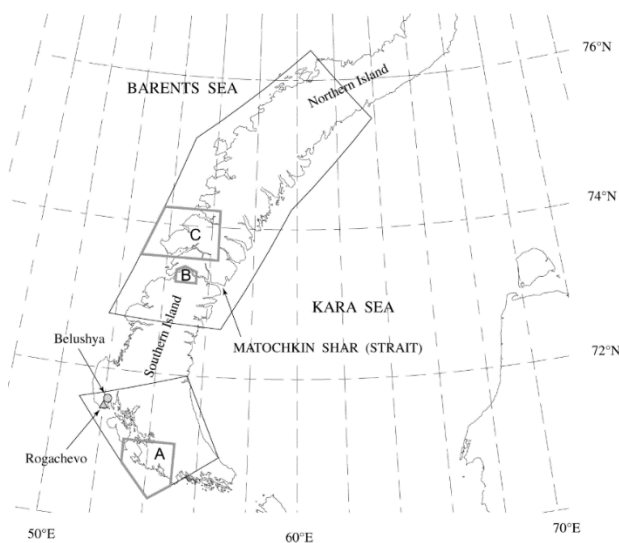
У периоду од 1956. до 1961. године развијено је неколико различитих области и опремљен за експерименте нуклеарног тестирања. Први од њих био је у зони А, на NZTS. Током мораторијума на нуклеарна тестирања од новембра 1958. до августа 1961. створена је екстензивна експериментална област посебно за атмосферске тестове са веома великим приносом (на нивоу од 100 мт) у зони С, Суви рт (19).

Полигон тестирања у Новој Земљи је подељен у три зоне:

1. Зона А: У Губи Черној (слика 3.4) између 1955. и 1962. Совјети су спровели прва и једина површинска нуклеарна експлозија, три подводна и два надводна нуклеарна теста. Касније су бушотине за извођење UNT-а избушене неких 20–25km западно од првобитног подручја тестирања. Између 1972. и 1975. године спроведено је шест UNT-а у шест бушотина (19).
2. Зона В: Насеље под именом Северни је основано на јужна обала мореуза Маточкин Шар близу ушћа реке Шумилихе. За извођење UNT-а изабрано је планинско подручје такође на јужној обали мореуза. Бројне акумулације су изграђене између 1960. и 1990. године, а у 36 од њих изведена су 33 UNT-а. На овом подручју се налазе два главна експериментална поља: поље D-9 је подручје на којем су UNT-

ови вођени у адитивима и обухвата насеље у Северни. Друга област, поље D-11, садржи нове рушевине, које нису коришћене (19).

- Зона С: Северно од Маточкиног Шара је област дуж обале Баренцовог мора која је само део Северног острва Нове земље који се користи за нуклеарна тестирања. Коришћен је посебно за атмосферске и висинске експлозије највећег приноса. У овим тестовима, нуклеарне бомбе су или бачене из авиона или су испоручене ракетама. Највећа совјетска нуклеарна проба (30. октобар 1961, 58Mt) детонирана је изнад овог подручја на висини од око 4km (19).



Илустрација 3.4 Подела NZTS-а по областима тестирања

У Новој Земљи вршена су три типа тестирања:

- ПОДВОДНИ, НАДВОДНИ И ПОВРШИНСКИ НУКЛЕАРНИ ТЕСТОВИ У НЗТС, 1955—1962: Шест нуклеарних експлозија ова три типа изведено је у НЗТС од септембра 1955. до октобра 1962. Датуми тестирања, јачине бомби и типови тетсирања су приказани у Табели 3.3 (19,22).

N	Датум	Тип	Јачина [kt]	Н [m]
1	21. септембар 1955	Подводи	3,5	-12
2	7. септембар 1957	Површински	32	+15
3	10. октобар 1957	Подводни	10	-30
4	23. октобар 1961	Подводни	4,8	-20
5	27. октобар 1961	Изнад воде	16	+1,1
6	22. август 1962	Изнад воде	6	0

Табела 3.3 Подводни, надводни и површински нуклеарни тестови 1955-1962

2. АТМОСФЕРСКИ НУКЛЕАРНИ ТЕСТОВИ, 1955—1962: Осамдесет пет атмосферских нуклеарних тестова (ANT) извршено је у NZTS између 24. септембра 1957. и 25. децембра 1962. године. Две атмосферске експлозије нису успеле: 19. октобра 1958. и 25. октобра 1958. Подаци о овим тестовима приказани су у табелама 3.4 и 3.5 (19,22).

	Септембар- Октобар	Фебруар- Октобар	Септембар- Новембар	Август- Децембар	Укупно
Година	1957	1958	1961	1962	
Број тестова	2	24	24	35	85
Годишња јачина [Mt]	4,5	16,2	86,2	132,7	239,6

Табела 3.4 Период ANT у NZTS

Ранг јачине [kt]	Број тестова
$Y < 10$	12
$10 \leq Y < 100$	12
$100 \leq Y < 1\ 000$	21
$1\ 000 \leq Y < 3\ 000$	24
$3\ 000 \leq Y < 5\ 000$	5
$5\ 000 \leq Y < 10\ 000$	5
$10\ 000 \leq Y$	6

Табела 3.5 Јачине ANT у NZTS (Y представља принос експлозије)

30. октобра 1961. године, експлодирала је најмоћнија атмосферска бомба, кодног назива „BIG IVAN“. Експлодирала је на висини од око 4000m изнад испитног поља, у близини Сувог рта. Ово је око 55km северно од насеља Северни и 250km северно од седишта у Белушију, одакле га је посматрала Државна комисија. Иако је експлодирао у атмосфери генерисао је неколико типова сеизмичког сигнала. Зона убојства и разарања станова била је до 120km; зона оштећења ока износила је 220km; уочен је ударни талас у ваздуху у насељу Диксон, на 700km; прозорска стакла су делимично полумљена на удаљености од 900km. Људи су осетили сеизмички талас тачно у тренутку бљеска светлости од експлозије. Све зграде у Северном (и дрвене и зидане), на удаљености од 55km, потпуно су уништене. Ваздушни талас који је прошао око света изазвао је промену густине ваздуха, што је резултирало сигнаlima на дугопериодним сеизмометрима са вертикалном компонентом због промене узгона инерцијалне масе (19).

Радиоактивност ослобођена атмосферским нуклеарним тестирањем у Новој Земљи је снимана широм света, а посебно унутар Совјетског Савеза, мрежом од више од 500 станица Државног метеоролошког завода, које су, заједно са станицама којима управљају друге владине агенције, биле опремљене стандардним инструментима за праћење радионуклида (19).

3. ПОДЗЕМНИ НУКЛЕАРНИ ТЕСТОВИ: Два различита научна института (центра) за нуклеарно оружје била су организована у СССР-у. Оба института су била одговорна за све фазе развоја нуклеарног оружја, укључујући конструкцију и тестирање. Први Институт је основан априла 1946. Његов данашњи назив је Институт за експерименталну физику. Налази се у малом граду Саров око 700km источно од Москве, а његово кодно име је било Арзамас-16. Други Институт је основан 1955. године и сада се зове Институт за техничку физику. Налази се у малом затвореном граду Снежинску, у близини Чељабинска на Јужном Уралу и његово кодно име је било Чељабинск-70. Два института су поставила укупно 39 UNT-а у NZTS током 1964–1990. Арзамас-16 је развио, координирао и водио осамнаест UNT-а у NZTS; тринаест UNT-а је било у надлежности Чељабинска-70; осам UNT-а укључивало је оба института. Билатерални Уговор о забрани тестирања прага потписан 1974. одређује ограничење од 150kt за UNT-ове почевши од 31. марта 1976. За 20 UNT-а на NZTS-у пре овог датума, укупан принос је био 23,77Mt са просечним приносом од око 1,19Mt. Укупан принос 19 UNT-а на NZTS-у након марта 1976. био је 1,94Mt са просечним приносом од око 100kt. Већина тестова је обављена у периоду август–новембар, пре него што су пловне руте затворене због леда. Извршено је укупно 39 подземних нуклеарних проба, последњи 24. октобра 1990. године. Од 1966. до 1975. спроведено је једанаест подземних нуклеарних тестова величине мегатона — осам у северној области (Маточкин Шар) и три у јужној области (Красино). Најмоћнији совјетски UNT (принос ~4,2Mt) изведен је у северном тестном подручју 12. септембра 1973. Најмоћнији тест у јужној области ($I=3,5Mt$) је детониран на 27. октобар 1973. (19).

Два најмоћнија совјетска UNT-а изведена су на NZTS током јесени 1973. 12. септембра 1973. четири нуклеарна уређаја, укупне снаге 4,2Mt, експлодирала су у северној области. (19).

Од 1994. године у NZTS су успешно изведени бројни додатни хидродинамички и хидронуклеарни експерименти. Њихов главни циљ био је симулирање нуклеарних несрећа

и развој метода за спречавање ненамерног ослобађања нуклеарне експлозивне енергије. Четрнаест серија хидродинамичких експеримената изведена је 1995–1996 (19).

3.2.3 Диспанзер бр. 4

Током читавог периода нуклеарног тестирања, дозе зрачења за становништво на територијама у близини STS проверавало је Министарство одбране СССР-а без икаквог алтернативног праћења од стране савезних или локалних институција укључених у јавно здравље. Године 1957. основана је тајна медицинска установа специјализована за онкологију под називом „Диспанзер бр. 4“. Поред уобичајених клиничких и биомедицинских активности, дозиметрију зрачења радило је особље до 1991. Током скоро 20 година за процену изложености коришћени су само параметри две најважније атмосферске експлозије 1949. и 1953. године, а прорачуни су рађени по методологији Министарства одбране. (15)

Студија је спроведена између 1956. и 1960. године након што је пријављена „непозната интоксикација“ код стоке, која се налазила близу епицентра нуклеарног тестирања. Свеобухватна студија је укључивала мерење α и β активности у земљишту, биљкама и прехранбеним производима, ветеринарски преглед стоке, као и упоредни медицински преглед здравственог стања становништва. Пријављено да нивои зрачења у узорцима земљишта знатно премашују совјетске границе активности од 10-7Ci/kg. Даље, ова рана експедиција је пронашла патолошке промене органа код оваца и коза у областима близу места тестирања. Лекарима су прегледали 1635 људи старости од 4 до 90 година у пет округа Семипалатинске и Алматинске области. Извештај за становништво Семипалатинске области показао је високу преваленцију хематолошких промена и низ вегетативних поремећаја, поремећаја гастроинтестиналног тракта и респираторног система. Ова стања су описана као масовне појаве, које се јављају код здравих особа, али и код младих. Аутори извештаја су дошли до закључка да уочена патологија може указивати на „хроничну радијациону болест“. Диспанзер бр. 4, 1957. године отвара специјализовани центар за проучавање ефеката зрачења у Семипалатинску. Његови главни задаци укључивали су праћење радијације, процену утицаја на здравље услед падавина и медицинско праћење становништва које живи у областима погођеним падавинама. Фокусирајући се на проучавање медицинских ефеката, институт је проширио своје истраживачке активности биолошке ефекте зрачења, цитогенетику и медицинско праћење током 1970-их. Први интерни извештај састављен 1981. године упоредио је високо изложену популацију

(утврђену према старости у тренутку излагања), извештавајући о повећању стопе солидног канцера у високо изложеној групи (11).

Полигон за нуклеарно тестирање званично је затворен указом председника Нурсултана Назарбајев 29. августа 1991, 42 године након прве совјетске пробе атомске бомбе (11).

3.3 Чернобилска експлозија

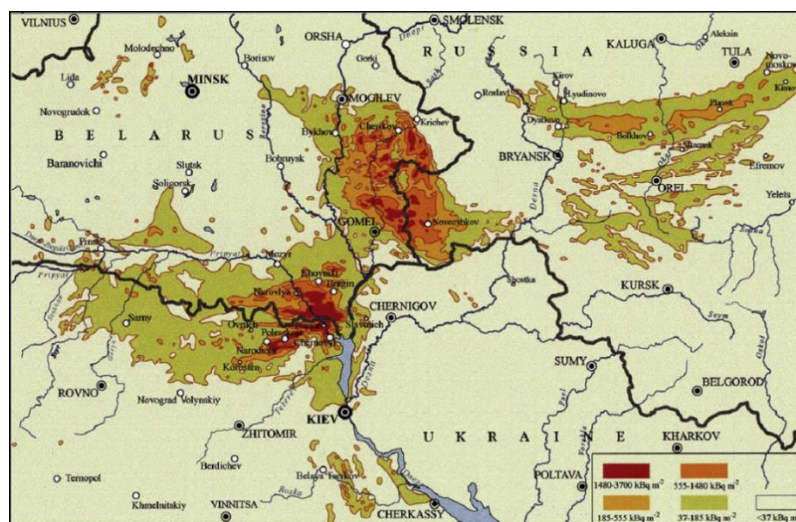
Несрећа у нуклеарној електрани Чернобил (CNPP³⁰) била је најгора индустријска несрећа која је укључивала јонизујуће зрачење у XX. веку. CNPP се налази на северу Украјине, близу граница три државе, Украјине, Белорусије и Русије. Несрећа у реактору број 4 догодила се нешто после поноћи 26. априла 1986. Због недостатака у дизајну реактора и људске грешке током експерименталних операција непосредно пре несреће, прегревање горивих шипки и фрагментација у активној зони довели су до брзог преноса прекомерне воде за хлађење и изазвала ударни талас који је разбио спојеве цевовода примарног расхладног система. Вода која је цурела одмах се претворила у пару. Ова прва експлозија изазвала је померање језгра реактора током којег је преостала расхладна вода избачена из система. Без расхладне течности, део нуклеарног горива је испарио као резултат повећане температуре и то је на крају резултирало великом експлозијом која је уништила реактор и зграду око њега, распршивши реакторске остатке и радиоактивне материјале у CNPP, непосредну близину и шире, у околину. Први пожари који су настали након велике експлозије стављени су под контролу до краја ноћи удеса. Међутим, гориви материјала који су остали на месту топљења су се загрејали, запалили су запаљиве производе који су се формирали у поремећеном миљеу језгра и изазвали експлозивни пожар. Уложени су огромни напори да се он угаси, укључујући бацање разних материјала за контролу фисије и пожара из хеликоптера, али се радиоактивно испуштање наставило још око 10 дана. (23)

Током прве ноћи несреће погинуло је седам људи: два члана особља и пет ватрогасаца који су учествовали у гашењу пожара. Међу 237 ватрогасаца и радника CNPP прегледаних у року од неколико дана на акутну радијационе болести, манифестације различитог степена тежине констатоване су код 134 особе. (23)

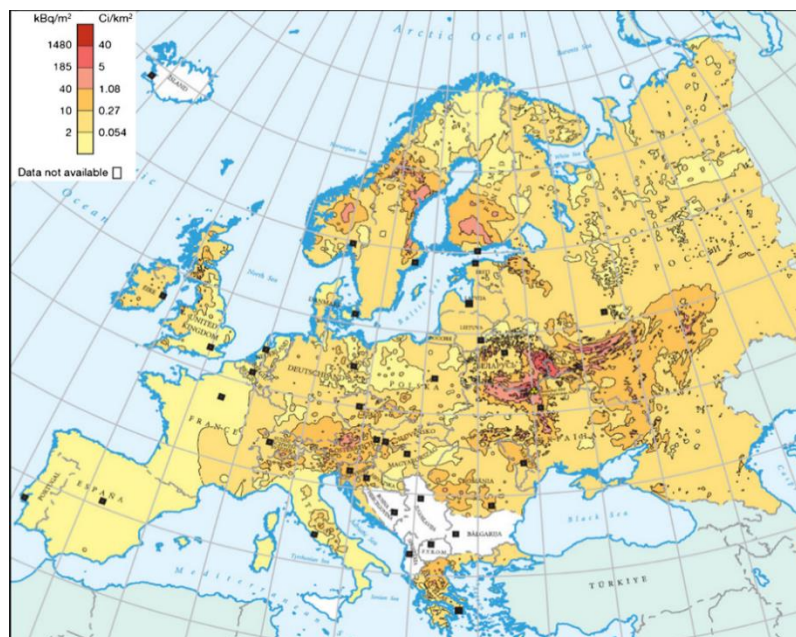
Процењено ослобађање радиоактивности из уништеног реактора достигло је укупно око 13ЕВq. Главни ослобођени радионуклиди, I-131 и Cs-137, су најзначајнији за дозу коју прима изложена популација. Радиоактивне емисије из CNPP карактерише широк спектар

³⁰ Chernobyl nuclear power plant

физичко-хемијских облика и састава: гасовити, парни аеросол, смеше аеросола, честице горива, минералне честице са заробљеним радионуклидима, агрегати различитих минералних честица и органских једињења. Састав је варирао од моноелементних племенитих гасова и атомског јода или рутенијума, до вишеелементних једињења и агрегата, компоненти горива, графита, силиката и других, сваки са различитим пропорцијама радионуклида. Седамдесет пет процената контаминације Cs-137 унутар зоне искључења (зона од 30 km око CNPP) такође се може приписати овом физичком облику. На већим удаљеностима, контаминација територија у европским земљама била је последица парних аеросола и смеша гасова, као и честица субмикронске величине које садрже Ru-103, Ru-106, I-131, I-133, Te-132, C-134, Cs-137 и радиоактивне племените гасове. Исти изотопи су такође откривени у Тихом и Атлантском океану, па чак и у Америци и Азији, наглашавајући глобалне размере несреће. Након завршетка изградње саркофага око уништеног реактора и зграде у новембру 1986. године, активне емисије у животну средину више нису примећене. (23)



Илустрација 3.5 Таложење Cs-137 у Украјни, Русији и Белорусији око места несреће



Илустрација 3.6 Таложење Cs-137 у Европи након несреће

	37-185 kBq/m²	185-555 kBq/m²	555-1480kBq/m²	>1480 kBq/m²
СССР	49 800	5 700	2 100	300
Белорусија	29 900	10 200	4 200	2 200
Украјна	37 200	3 200	900	600
Шведска	12 000			
Финска	11 500			
Аустрија	8 600			
Норвешка	5 200			
Бугарска	4 800			
Швајцарска	1 300			
Грчка	1 200			
Словенија	300			
Италија	300			
Молдавија	60			

Табела 3.6 Области са распрострањеним Cs-137 по km²

3.3.1 Радионуклиди пронађени у атмосферским аеросолима и узорцима земљишта након Чернобилске експлозије

После акцидента у Чернобилу велика количина радиоактивних материја је испуштена у атмосферу. Мерења спроведена у многим земљама показала су разлике не само у односу контаминирајућих радионуклида већ и у њиховој специјацији. У зависности од удаљености од Чернобила и специфичности транспорта, контаминација је садржала различиту пропорцију кондензованог материјала и компоненти горива. На великој удаљености кондензована материја је доминирала у аеросолима и површинским таложењима. На пример, специјација Cs-137 у узорцима аеросола прикупљеним у Вилњусу током несреће у Чернобилу одликује се високом растворљивошћу оба радионуклида и може се приписати углавном кондензованој материји. Последњих година у литванској атмосфери откривени су радионуклиди чернобилског порекла. Они углавном потичу од ресуспензије честица тла и шумских пожара. Изотопи Cs транспортовани у Литванији након шумских пожара у Украјини и Белорусији одликују се својом високом растворљивошћу и последично високом биодоступношћу. (24,25)

Подаци добијени током шумских пожара показали су да је дошло до трансформације носилаца радионуклида. Анализа дистрибуције величине аеросола и специјације радионуклида омогућила нам је да објаснимо посебности преноса и својства радионуклида измерених у граду Вилњусу након шумских пожара у Белорусији. Анализа метеоролошке ситуације је омогућила да се идентификује повећање концентрације Cs-137 забележено у Вилњусу у септембру 1992. године као последица олујне прашине која је дошла из Украјине. Треба напоменути да су суви временски услови у пролеће - лето 1992. године изазвали јаке шумске пожаре и олујне прашине на високо контаминираним територијама Украјине и Белорусије. (24,25)

После пешчаних олуја у Украјини, две врсте атмосферских аеросола који носе цезијум су откривене у Вилњусу: у првој, специјација Cs-137 и била је блиска оној која се налази у земљишту. У другом су пронађени изузетно нерастворљиви (остатак до 94%) облици Cs изотопа. Обично удео заосталог Cs-137 (након екстракције киселине) варира између 20-40% , иако је утврђено да је релативно висок проценат Cs-137 (до 70%) повезан са остатком у земљишту Вилјуна из Украјине. Већи садржај заосталог Cs у узорцима аеросола може се објаснити трансформацијом аеросола током ваздушног транспорта. Алтернативно, на горњи слој земљишта може утицати висока температура током шумских пожара, а специјација радионуклида може бити промењена. (24,25)

4 Улазак радионуклида у ланац исхране

4.1 Природни радионуклиди

Радиоактивни изотопи одређених елемената се континуирано формирају у горњој атмосфери интеракцијом космичког зрачења са елементима присутним у атмосфери. Тако се C-14 и H-3 производе интеракцијом неутрона космичких зрака са азотом. Они се распадају, C-14 са временом полураспада од 5730 година, H-3 са полуживотом од 12,3 године, емитујући β зраке (1).

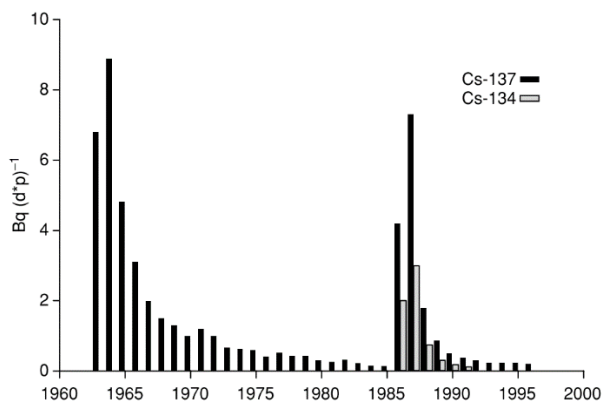
Други радиоактивни изотопи настају нуклеарним процесима повезаним са настанком Земље. Представник ове групе је K-40, који се распада са временом полураспада од преко 109 година, емитујући електроне и γ зрачење. Тело одраслог човека (70 kg) садржи око 13 kg угљеника са 3000 Bq C-14, 50 kg воде са 20 Bq H-3 и 140 g калијума са 4300 Bq K-40. Што се тиче космогених радионуклида и K-40, подаци о концентрацијама активности у храни и људском телу прилично су уједначени у целом свету, док радионуклиди серије уранијума и торијума могу бити присутни у знатно вишим нивоима у зависности од локалних геолошких услова (1).

За разлику од α и β зрачења, које не може дубоко да продре у материју, γ зрачење има велику продорну моћ. Тако се K-40 у телу може одредити мерењем γ зрачења изван овог тела. Доступни су бројачи целог тела за људе и животиње који дозвољавају мерење K-40 и других радионуклида који емитују γ зрачење. Пошто је масно ткиво мање-више ослобођено калијума, на овај начин се може одредити мишићна телесна маса. Принцип се такође може користити за неструктивну процену садржаја масти у месу (1).

4.2 Вештачки створени радионуклиди

Од прве нуклеарне пробне експлозије у пустињи Новог Мексика 16. јула 1945. године, велике количине радиоактивних фисионих продуката су пуштене у стратосферу и на крају су се наталожиле на површини земље као „радиоактивне падавине“. Краткоживећи радионуклиди као што је I-131, β и γ емитер са полураспадом од 8 дана, брзо нестају, док су дугоживећи радионуклиди остали у биосфери дуги низ година, а најважнији је Cs-137, β и γ емитер са временом полураспада од 30 година (26). Укупно ослобађање Cs-137 атмосферским тестовима било је око 960 PBq. Радиоактивност у храни достигла је врхунац 1964. године, када је ступио на снагу споразум између бившег Совјетског Савеза и САД о заустављању атмосферских тестирања нуклеарног оружја (27).

Годишњи просеци специфичне активности радиоцезијума у укупним узорцима исхране из Немачке приказани су на илустрацији 4.1. Резултати добијени током 1960-их и 1970-их у другим земљама севера, које су примиле највеће количине контаминираних падавина, били су слични. После врхунца 1964. године, активност цезијума опада брзо. Ово је последица рапидног везивања јона цезијума таложених на листовима биљака. (26,27).



Илустрација 4.1 Мерене активности радиоактивног цезијума у Немачкој након експлозије у Чернобилу (27)

Променљиви ветрови су носили радиоактивне облаке над разним деловима бившег Совјетског Савеза, Скандинавије, Централне Европе, балканских земаља и Турске. Доминантни радионуклид током прве 2 недеље био је I-131. Кравље млеко у неким деловима Аустрије, Немачке и Швајцарске достигло је концентрацију активности од неколико стотина бекерела по литру током прве недеље маја. Краткоживећи нуклиди су брзо нестали из околине, а два нуклида цезијума, Cs-134 и Cs-137 су постала доминантна (26,27).

Резултати приказани на илустрацији 4.1 омогућавају поређење радиоцезијума у укупној исхрани након несреће у Чернобилу са оним уоченим у време атмосферског тестирања нуклеарног оружја. Подаци из пречернобилских година представљају само Cs-137 (мерљиви нивои Cs-134 нису били присутни након тестова оружја), док они из првих постчернобилских година такође показују Cs-134, који је – због свог кратког времена полураспада – опао до испод мерљивих нивоа до 1990. Може изгледати изненађујуће да илустрација 4.1 указује на већи унос радиоцезијума 1987. него 1986. Ово је углавном због чињенице да је 1986. радиоактивност из Чернобила играла улогу само од маја до децембра. Са изузетком млека и свежег воћа и поврћа, већина хране и сточне хране потрошене у 1986. години потиче из бербе 1985. године; тек када су пречернобилске залихе житарица, кромпира и смрзнуте и конзервисане хране биле у великој мери исцрпљене, највећи дневни унос од 11 Bq Cs-137 и 5 Bq Cs-134 је достигнут у марту 1987 (26,27).

Храна	Вq/kg свеже тежине		
	Cs-137 (1986)	Cs-134 (1986)	K-90
Жито	7	0,11	130
Јечам	12	0,15	140
Раж	16	0,21	140
Кромпир	3	0,17	130
Грашак	7	0,04	98
Шаргарепа	5	0,15	80
Јабука	20	0,13	40
Дивље боровнице	140	54	22
Дивље гљиве	2*10 ⁴	170	95-170
Говедина	50	1,1	115
Свињетина	19	0,33	115
Телетина	41	1,3	115
Дивљач (срна)	10 ⁴	50	100
Кокошија јаја	5	0,1	23
Кравље млеко	8	0,2	46
Риба из Балтичког мора	4	9	90-140
Риба из Северног мора	3	0,5	90-140

Табела 4.1 Типична активност Cs—137 у разноликој храни након Чернобилске експлозије (27)

У свим областима, локално таложење чернобилских падавина значајно је варијало, углавном у зависности од количине падавина током критичних дана; радиоактивност у усевиима и животињским производима се разликовала у складу са тим, узорци узети у јужној Немачкој генерално су показивали два до пет пута већу контаминацију од оних узетих даље на северу. У ратарским усевиима и производима добијеним од домаћих животиња, концентрација Cs-137 се вратила на ниво пре Чернобила до 1996. године; дивљач, дивље гљиве и боровнице и риба из Балтичког мора и даље показују повишене нивое радиоактивности, иако се чини да они нису високи у поређењу са природним нивоима К-40. Акумулација цезијума у печуркама зависи од врсте; у првим годинама након несреће у Чернобиљу неке врсте, као што је вргањ³¹, достигле су концентрације Cs-137 од много хиљада бекерела по килограму у неким узорцима, док су друге врсте које расту у истом

³¹ *Xerocomus badius*, лат.

станишту акумулирале врло мало радиоактивности. Понекад веома високе концентрације Cs-137 у дивљачи су бар делимично, можда првенствено, последица конзумирања печурака од стране животиња. Високе активности Cs-137 у дивљим боровницама и другим врстама шумских бобица вероватно су последица генерално киселијег рН шумског земљишта, што чини цезијум доступнијим за апсорпцију из корена биљака (26,27).

4.3 Пољопривредни фактори

Радионуклиди депоновани у земљишту могу ући у ланац исхране на следеће начине:

1. Директним наношењем на лишће или изложене делове биљака које једу људи или друге животиње,
2. Постојаношћу у слојевима земље из којих се, кроз корени систем, уносе у биљке које растуна том земљишту,
3. Ресуспендовањем у облику прашине са земље или са других изложених површина,
4. Испирањем са површинских или дубљих слојева земље у изворе воде који се користе за пиће људи или животиња или за наводњавање, или као рибњаци или други извори хране.

Важност сваког од ових потенцијалних извора контаминације у исхрани зависи од количине различитих материјала који се користе у регионалним типовима исхране и, у случају краткоживећих радионуклида, од интервала између њиховог таложења и њиховог проласка кроз земљиште или кроз животињске врсте, у храну за конзумирање. У случају фолијарног таложења, променљиве пропорције депонованог материјала могу се уклонити из поврћа пре људске исхране прањем или уклањањем спољашњих листова, иако ће неки део бити уграђен у ткива биљке која расте путем фолијарне апсорпције.

За дугоживеће радионуклиде, међутим, ситуација је другачија, јер је мало таквих материјала селективно концентрисано у млеку, а њихова постојаност у земљишту може довести до тога да они настављају да улазе у ланац исхране током дугих периода у фолијарно депоновање и апсорпцију у почетку. Изотопи Cs постају широко распрострањени у биљним и животињским ткивима на исти начин као и калијум. Релативно обилни производи фисије Cs-137 и Cs-134, који остају углавном у горњих неколико центиметара тла, могу се стога унети у биљке и изазивају продужену контаминацију сточне хране и исхране људи. Они стога могу изазвати умерену, али континуирану контаминацију људске исхране.

У неким околностима битан је и облик биљног покривача, посебно код арктичких лишајева код којих је циклус раста веома дуг, тако да Cs-137 може остати у биљним ткивима на којима је депонован и до 15 година. Ова продужена контаминација, у комбинацији са великим површинама које свакодневно пасу ирваси или карибуи, може довести до много виших нивоа Cs-137 у месу ових животиња него у месу других животиња које су биле подвргнуте истим нивоима почетне контаминације пашњака.

Карактеристике земљишта су стога важне у односу и на физичко и на хемијско стање депонованих радионуклида. Ово последње може бити критично у погледу:

1. Њиховог таложења у растворљивом, нерастворљивом или у облику честица, јер посебно утиче на њихово испирање водом;
2. Њихово фиксирање у састојцима земљишта и њихово "разблаживање" много већим масама истих елемената присутних у стабилном облику, или хемијски аналогних елемената, као што је Cs помоћу K, или изотопа Sr у земљиштима богатим Ca.

4.4 Трансмисија путем животињског ткива

Радионуклиди присутни у храни или води за животиње, дистрибуирају се кроз телесна ткива и даље, што зависи углавном од хемијске природе унесеног материјала. Као што је брзина којом се краткоживећи радиоизотоп I-131 појављује у млеку, важна у раним фазама контаминације животне средине, тако је и биолошко полувреме дугоживећих изотопа релевантна за дуготрајну активност животињских мишића и других телесних ткива која се користе у људској исхрани. Важно је знати биолошко полувреме за различите уграђене радионуклиде да би се проценило не само колико дуго ће контаминација меса заостајати за одговарајућом контаминацијом у исхрани животиња, већ и вредност преласка животиња са високо контаминираних пашњака на пашњак који је мање контаминиран, на пример, зато што на њега није падала киша током проласка радиоактивног облака. Недавни докази указују на прилично брзо излучивање цезијума Cs-137 из оваца када су пребачене са брдских пашњака на којима су се десиле јаке падавине и контаминација након испуштања у Чернобилу, на суседно ниско земљиште и релативно незагађен пашњак. (26)

Ова биолошко полувреме ће сигурно варирати у зависности од хемијске природе укључених радионуклида.

Многи други аспекти дуготрајне контаминације исхраном су прилично у потпуности испитани и објевљени у раним публикацијама UNSCEAR³²-а. Пошто су падавине које су резултат атмосферских нуклеарних тестова биле много уједначеније на регионалном нивоу од било ког кратког периода испуштања на ниском нивоу из једног извора, могућност смањења контаминације исхраном локалним кретањем животиња на неконтаминирани пашњаке у кратким периодима пре употребе у исхрани, није имала једнаку практичну вредност за ове различите ситуације. Такође, предвидљиво дуги наставак падавина из стратосферског резервоара понудио је смањен подстицај за проучавање могућности преласка на било коју неконтаминирану храну. (26)

4.5 Контаминација у води

Урађено је много корисног посла на испитивању уласку радионуклида у ланце исхране након њиховог испуштања у језера или реке, или њиховог уласка у мора и океане. Овде треба обратити пажњу и на краткорочне и на дугорочне дистрибуције. (26)

Краткорочно - првих неколико година након доласка радиоактивног материјала у језера или мора - односи концентрација различитих радионуклида су важни, као између морске или слатке воде и јестивог ткива не само риба, мекушаца и ракова већ и свих локално јестивих облика водених биљака. У животињским облицима, концентрација изотопа Cs је од велике важности. Драгоцено је да се дозиметријски значај контаминације у исхрани радиоактивним Cs може директно проценити методама бројања целог тела. (26)

Тако се 1977. године, током истраживања развоја постројења за прераду нуклеарног горива у Селфилду, у Уједињеном Краљевству, 17 људи, који живе близу Виндскејла, добровољно јавило да изврши таква мерења након периода у којем је радиоактивност локално уловљене рибе и ракова који се користе у исхрани мерена дуплим узорковањем.

Такође је пријављено да је слично бројање целог тела било од значаја за процену дозе због радиоактивног Cs у исхрани добијеном са копна у СССР-у након експлозије у Чернобилу. Ова могућност директне валидације величине великог доприноса дози од контаминације ланца исхране је олакшана лакоћом и прецизношћу са којом се може одредити садржај радиоцезијума у телу и релативно дугим полувремом задржавања Cs-137 код људи - око 100 дана за главни део уноса код одраслих, са краћим полувременом код деце. (26)

³² United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radioation

Краткорочно, такође, процена контаминације исхраном захтева разматрање било каквог испуштања радионуклида у залихе воде које се користе или директно за пиће или за наводњавање земљишта које се користи за производњу хране. Такође је вероватно да ресуспензија материјала депонованог на плажама може бити значајна у неким околностима. Спреј ветра из обалних вода такође може допринети овој активности, као што сугерише повећана активност неких уских зона приобалног земљишта. (26)

4.6 Информације о исхрани

Познато је да различити путеви којима радионуклиди испуштени у животну средину улазе у људску исхрану и низ научних дисциплина које су укључене у њихову студију указују на важност студија које су направљене о ланцима исхране.

Такође је важно да се зна и документује нормалан састав исхране која се користи у различитим регионима, са њиховим сезонским варијацијама, локалитетима са којих се црпе различити главни састојци, и типичним интервалима између њихове жетве и њихове потрошње. Главне варијације ових дијета, посебно код одојчади и деце, такође треба да буду познате. (26)

Постоји неколико разлога зашто је важно да се прикупи база података, макар и само у ширем смислу, о регионалним обрасцима и варијацијама у саставу исхране, посебно:

1. да се омогући брзо деловање у хитним случајевима;
2. да обезбеди одговарајућу континуирану акцију у примени здравих смерница у контроли залиха хране и
3. успоставити и објаснити одговарајућу равнотежу између штете од забране или ограничавања снабдевања храном и наставка без ограничења. (26)

У хитним случајевима неопходно је знати које врсте хране ће вероватно изазвати највеће дозе зрачења у раним фазама случајног ослобађања, тако да се могу предузети исправне тренутне мере у смислу једноставних, раних мерења и познавања врсте ослобађања (26).

Како се буде појављивало више детаља о саставу загађења животне средине и исхране, такође ће бити важно размотрити које локалне или регионалне модификације треба направити на општим нивоима интервенције за храну која је раније примењена на основу непотпуних информација. Ефикасна заштита од зрачења ће нужно зависити од компромиса између широке примене истих нивоа интервенције у свим регионима и административно и презентацијски сложенијих процедура које укључују примену посебних ограничења у

регионима који користе изразито различите изворе исхране. Штавише, барем у принципу, свако ограничење – било локално или опште – требало би да узме у обзир укупне потешкоће, штете и ризике који би проистекли из ограничења, као и ризике радијације због наставка неограничене употребе компоненти исхране у питању.

4.7 Дозе и ризици од унесених радионуклида

Ризици од било ког датог уноса радионуклида храном (и водом) могу се проценити са разумном поузданошћу. Са знањем о концентрацији различитих радионуклида у исхрани и просечној количини те хране или течности која се дневно конзумира, доступни су подаци за процену количине сваког радионуклида који ће се апсорбовати из црева и задржати у телу или у органима. Процењене су дужине задржавања у овим органима, а тиме и дозе зрачења које им се испоручују – и за одрасле (15) и за децу (нпр. 10 година) и одојчад (1 година). У случају неких елемената, апсорпција и задржавање могу зависити од хемијских облика у којима су радионуклиди присутни у храни, али се могу направити приближне процене укупних доза које се испоручују у органе услед континуиране употребе неке дијететске компоненте у датом тренутку, ниво и врста контаминације. Могући биолошки ефекти употребе ове намирнице се затим могу проценити у светлу доказа из хуманих епидемиолошких истраживања о ризицима од изазивања рака или других ефеката зрачења на цело тело или органе, или података о генетском оштећењу друге врсте. (26)

Јасно је да је важно направити такве објективне процене доза, а тиме и потенцијалних ризика који би се избегли забраном или ограничавањем употребе одређених класа хране са одређеним нивоима и типовима концентрације радионуклида. Тада се могу предложити „референтни нивои“ дозе, испод којих ће акција вероватно бити неприкладна, али изнад којих би интервенција требало да се предузме или барем озбиљно размотри. Референтни ниво апсорбоване дозе може се изразити као резултат продужене употребе стално контаминиране хране или, једноставније и предвидљивије, оног из употребе сваке године. У потоњем случају, ниво апсорбоване дозе могао би се разматрати у општем контексту препоруке Међународне комисије за радиолошку заштиту да се изложеност припадника јавности (пored оних из природних извора и медицинских) треба ограничити на „просечну годишњу дозу током живота од 1 mSv“ са „споредном границом дозе од 5 mSv у години током неколико година“ под условом да се не прекорачи граница просечног животног века. (26)

Чини се важним да објективне процене безбедности или ризика од наставка употребе хране треба узети у обзир када се доносе одлуке о нумеричкој вредности „референтних нивоа“ дозе и одговарајућих „изведених референтних нивоа“ концентрација радионуклида посебно намирнице.

Међутим, мора се признати да нам је потребно више информација, дискусија и процена потешкоћа и ризика ограничавања употребе било ког производа у исхрани, посебно начина на који се ове потешкоће разликују у различитим регионима и са различитим обрасцима исхране. Свакако да може бити тешко проценити величину ових других ризика, упоредити ризике изложености јонизујућем зрачењу са привременим неугодностима мобилизације алтернативних извора хране, проценити повремене ризике од наглих промена у исхрани одојчета са крављег млека на неку алтернативу у праху, или да проценити ефекте наглих промена у исхрани широм арктичких територија.

Барем је важно да се „изведени референтни нивои“ за храну постављају са намером да се минимизира укупни ризик и штета и да снижавање референтног нивоа не доводи нужно до веће укупне безбедности. (26)

4.8 Дозиметријске величине и јединице

Поједини изрази употребљени у овом правилнику имају следеће значење:

1. Греј је јединица за апсорбовану дозу и Међународном систему јединица једнака количнику јединице за енергију и јединице за масу (28)
2. Излагање становништва је излагање услед ванредног догађаја, излагање услед одобрених примена извора зрачења, осим медицинског и професионалног излагања и излагање основном нивоу зрачења природе (28).
3. Интервентни ниво је вредност неке радиационе величине изнад које се морају предузети мере за санацију ванредног догађаја и смањење нивоа излагања (28).
4. Основни ниво зрачења из природе (фон) за дату локацију је укупно јонизујуће зрачење из извора природног порекла у тлу и космичког зрачења, до нивоа који није значајно повећан људским активностима (28).
5. Парцијално ограничење дозе је могућа граница дозе излагања појединаца од коонкретног извора јонизујућег зрачења или одобрене праксе, која у процесу оптимизације заштите од зрачења извора јонизујућег зрачења треба да осигура да укупно излагање појединаца у оквиру крличних група од свих

- контролисаних извора јонизујућих зрачења, односно одобрених пракси остане унутар граница дозе (28).
6. Парцијално ограничење дозе излагања становништва, представља горњу границу годишње дозе за појединце из становништва којој би они могли бити изложени од планиране припреме сваког појединачног контролисаног извора јонизујућег зрачења (28).
 7. Сиверт је јединица за еквивалент дозе димензионално једнака количнику јединице за енергију и јединице за масу (28).
 8. Спољашње излагање је излагање које настаје услед дејства извора јонизујућих зрачења изван организма човека (28).
 9. Ткивни тежишни фактори су бездиманциони фактори којима се изражава разлика у доприносу ткивних еквивалената дозе у ефективној дози (28).
 10. Унутрашње излагање је излагање које настаје услед дејства јонизујућих зрачења који се налазе у организму човека (28).
 11. Апсорбована доза (D) јесте енергија апсорбована по јединици масе (29).
 12. Граница излагања јесте вредност ефективне дозе или еквивалентне дозе у одређеном периоду која за појединца не сме бити прекорачена (29).
 13. Деконтаминација јесте поступак уклањања или смањења нивоа контаминације, који укључује и мере отклањања непосредне опасности наступања контаминације, мере контроле даљег ширења контаминације, изолацију и безбедно уклањање извора контаминације, као и радње везане за процену и анализу ризика наступања контаминације и процену и анализу штете у животној средини услед контаминације (29).
 14. Еквивалентна доза јесте апсорбована доза у ткиву или органу и зависи од врсте зрачења (29).
 15. Ефективна доза јесте збир еквивалентних доза у свим ткивима и органима тела од унутрашњег и спољашњег излагања (29).
 16. Излагање јесте чин излагања или стање изложености јонизујућем зрачењу емитованом ван тела (спољашње излагање) или унутар тела (унутрашње излагање) (29).
 17. Излагање становништва јесте излагање јонизујућем зрачењу појединаца, осим професионалног или медицинског излагања (29).

4.9 Методологија одређивања ефективне дозе

Унутрашње излагање се одређује директним мерењем радиоактивности целог тела или критичних органа, индиректном проценом на основу мерења концентрације радионуклида у биолошким узорцима или прорачуном очекиване ефективне дозе од уношења радионуклида у организам из радне средине у којој је мерењем утврђена површинска контаминација ваздуха. Процена доза услед унутрашњег излагања треба што реалније да узме у обзир податке о врсти и активности радионуклида који се испушта у животну средину, у хемијском и физичком облику, месту и начину испуштања, путевима уношења итд. При разматрању унутрашњег излагања такође се узима као важан фактор старосна група становнишва (28).

Укупна ефективна доза добија се сабирањем ефективне дозе која потиче од излагања спољашњем зрачењу и од зрачења радионуклида унетих ингестијом и инхалацијом:

$$E = E_s + \sum_j e(g)_{j,ing} I_{j,ing} + \sum_j e(g)_{j,inh} I_{j,inh}$$

Релација 4.1

где су E_s допринос спољашњег зрачења укупној ефективној дози, $e(g)_{j,inh}$, $e(g)_{j,ing}$ очекиване ефективне дозе по јединичном уносу радионуклида j унетог ингестијом или инхалацијом за појединца у одређеној старосној групи, $I_{j,inh}$, $I_{j,ing}$ одговарајуће активности радионуклида унетих путем хране или удисаја. Вредности $e(g)$ зависе од фактора f_1 , који описују утицај радионуклида присутног у цревима на друге органе и ткива (видети табелу 4.2) (28).

4.10 Правилник о границама радиоактивне контаминације лица, радне и животне средине и начину спровођења деконтаминације

Интерна контаминације човековог организма не сме прелазити границе годишњег уношења радионуклида које се израчунавају на следећи начин:

$$GGU_{n,ing} = \frac{GD}{e(g)_{n,ing}} \quad \text{Релација 4.2}$$

где су GD [Sv/god] (за становништво 1 mSv/god) граница ефективне дозе; $e(g)_{n,ing/n,inh}$ [Sv/Bq] очекивана ефективна доза по јединичном уношењу радионуклида ингестијом, или инхалацијом (30).

Вредности очекиваних ефективних доза по јединичном уношењу радионуклида ингестијом за становништво у одређеној старосној групи дата је за низ радиоактивних елемената и њихових изотопа (30). За потребе овог рада, издвојен је $e(g)$ Cs-137 (Табела 4.2).

Радионуклид	Време полураспада	Старост 1год		Старост преко 1 год	1-2 год	2-7 год	7-12 год	12-17 год	>17год	
		f1	e(g)	год f1	e(g)					
Cs-137	30,0 god	1000	2,1E-08	1000	1,2E-08	9,6E-09	1,9E-08	1,3E-08	1,3E-08	

Табела 4.2 Очекиване ефективне дозе по јединичном уносу $e(g)$ ингестијом [Sv/Bq] за становништво; g- старост f1- фракција стабилног елемента која доспева у телесне течности након уношења ингестијом

Ако постоји излагање јонизујућем зрачењу из два или више извора (укључујући и спољашње излагање), границе радиоактивне контаминације животне средине морају да задовоље следећи услов:

$$\frac{GU_{inh}}{GGU_{inh}} + \frac{GU_{ing}}{GGU_{ing}} + \frac{D_s}{GD} \leq 1 \quad \text{Релација 4.3}$$

GU_{inh} [Bq] – годишње уношење радионуклида инхалацијом, GGU_{inh} [Bq]- граница годишњег уношења радионуклида инхалацијом, GU_{ing} [Bq]- годишње уношење радионуклида водом и храном, GGU_{ing} [Bq]- граница годишњег уношења радионуклида водом и храном D_s [mSv/god]- доза спољашњег излагања професионално изложених лица и становништва и GD [mSv/god]- граница излагања професионално изложених лица и становништва (30).

5 Законска регулатива

Са обзиром на пређашња поменућа дешавања, не само у бившем СССР-у, већ широм Европе и целог света, становништво је и даље изложено радијацији. Не узимајући у обзир космичко зрачење којим је планета изложена, вештачки извори зрачења су далеко већег доприноса опасности по живи свет на Земљи. Претходно поменућа акта потписане од стране великих сила којима се забрањују и ограничавају нуклеарна тестирања и употреба нуклеарних оружја, свака земља има расписане законе и правила о употреби радиоактивних извора, нуклеарних постројења и нуклеарног оружја.

У овом поглављу представљени су најважнији закони и правила расписана у циљу заштите становника Републике Србије (Реф, Службени гласник РС: 38/2011, 95/2018, 10/2019, 86/2011, 50/2018 (28–30)).

5.1 Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности

Овим законом се уређују мере радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности, услови за обављање делатности са изворима зрачења, поступање у ситуацији планираног, постојећег и ванредног излагања јонизујућем зрачењу у циљу обезбеђивања заштите појединаца, становништва и животне средине од штетног утицаја јонизујућег зрачења, сада и убудуће (29).

Овим законом се оснива Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије ради вршења регулаторне контроле делатности уређених овим законом (29).

5.2 Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима

Овим правилником се прописују:

1. Врсте, начин и временски интервали мерења ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима професионално изложених лица, пацијената и становништва (28);
2. Садржај извештаја о мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима професионално изложених лица, пацијената и становништва; начину вођења евиденције, роковима чувања евиденције, као и о поступку обавештења надлежних органа (28);

3. Границе излагања јонизујућим зрачењима за професионално изложена лица, лица на школовању и становништво (28).

5.2.1 Врсте, начини и временски интервали мерења ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима

Јонизујућим зрачењима могу бити изложени: професионално изложена лица, лица на школовању, лица на обуци за рад са изворима јонизујућег зрачења, становништво и пацијенти (28).

Ефективна доза становништва је:

1. Увећана, уколико је већа од 1 mSv за годину дана;
2. Ниска, уколико је већа од 0,03 mSv за годину дана;
3. Веома ниска, уколико је мања или једнака 0,03 mSv за годину дана;
4. Занемарљива, уколико је мања или једнака 0,01 mSv за годину дана (28).

5.2.2 Границе излагања за становништво

Граница излагања за становништво односи се на јонизујућа зрачења која потичу од извора у контролисаној пракси (28).

Ефективна доза и еквиваленти доза излагања становништва изворима јонизујућих зрачења који се користе у контролисаној пракси одређује се прорачуном дозе за најизложенијег појединца из релевантне групе становништва (28).

Апсорбована доза рачуна се по следећој релацији:

$$D = \frac{dE}{dm} [Gy] \quad \text{Релација 5.1}$$

где су dE средња енергија јонизујућег зрачења предата материји по елементу запремине и dm маса материје у елементу запремине (28).

Еквивалент дозе H_T је производ средње апсорбоване дозе у ткиву или органу T , које преда зрачење врсте R и одговарајућег радијационог тежинског фактора w_R :

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} [Sv] \quad \text{Релација 5.2}$$

где су $D_{T,R}$ апсорбована доза усредњена по ткиву или органу T услед зрачења R и w_R је радијациони тежински фактор (28).

Када је зрачење састављено од више врста зрачења са различитим вредностима фактора w_R , укупни еквивалент дозе H израчунава се сабирањем по свим врстама зрачења (28).

Радијациони тежински фактор w_R је бездимензиони фактор којим се изражава разлика у биолошким ефектима различитих врста јонизујућих зрачења. Вредности радиојационих тежинских фактора за различите врсте енергије зрачења дата су у следећој табели:

Врста јонизујућег зрачења	w_R
Фотони, свих енергија	1
Електрони и миони свих енергија	1
Неутрони, енергија <10	5
Неутрони, од 10 до 100	10
Неутрони, од 100 до 2	20
Неутрони, од 2 до 20	10
Неутрони, преко 20	5
Протони, енергије 2	5
Алфа честице, фисиони фрагменти, тешка језгра	20

Табела 5.1 Вредности радиојационих тежинских фактора (28)

Ефективна доза E је сума отежаних еквивалената доза у свим ткивима и органима људског организма, а које потичу од унутрашњег и спољашњег излагања. Дефинише се изразом:

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Релација 5.3

где је w_T ткивни тежински фактор за ткиво или орган T . То је бездимензиони фактор који се користи у заштити од јонизујућих зрачења да би се узела у обзир различита осетљивост појединих органа и тјива за настанак стохастичких ефеката дејсва јонизујућих зрачења (28).

Вредности ткивних тежинских фактора дати су у Табели 5.2:

Ткиво или орган	w _T	Σw _T
Коштана срж (црвена), дебело црево, плућа, желудац, дојке, (преостали органи ³³)	0,12	0,72
Гонаде	0,08	0,08
Мокраћна бешика, једњак, јетра, штитаста жлезда	0,04	0,16
Кости, мозак, пљувачне жлезде, кожа	0,01	0,04
Укупно:		1,00

Табела 5.2 Вредности ткивних тежинских фактора

³³ Надбубрежна жлезда, мозак, екстраорокална регија, жучна кеса, срце, бубрези, лимфни чворови, мишићно ткиво, усна дупља, панкреас, простата, танка црева, слезина, тимус, материца/грлић

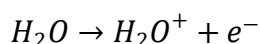
6 Биолошко дејство на организам

На микроскопском нивоу, упадни зраци или честице могу да ступе у интеракцију са орбиталним електронима унутар ћелијских атома и молекула изазивајући екситацију или јонизацију.

Излагање ћелијског материјала јонизујућем зрачењу доводи до стварања флукса енергетских секундарних честица (електрона). Ови електрони, високе енергије и невезани, способни су да мигрирају са места настанка и, кроз низ интеракција са другим атомима и молекулима, предају своју енергију околном медију. Овај процес апсорпције енергије доводи до стварања слободних радикала и других хемијских једињења. Управо та хемијска једињења која учествују у даљим хемијским интеракцијама су оно што је прави узрочници радијационих оштећења. Иако се хемијске промене одвијају у кратком временском оквиру ($\sim 10^{-5}$ s), овај период је ипак за фактор од $\sim 10^{18}$ дужи од времена потребног оригиналној честици да прође језгро ћелије. Тако, на микроскопској скали постоји релативно дуг период током којег долази до штете. (31)

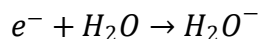
Јонизујуће зрачење може имати:

1. Директни ефекат- Најчешће узроковано алфа и бета честицама, када долази до директног кидања хемијских веза, а атоми и молекули остају са неспареним електроном који је врло реактиван. Процењује се да трћина биолошке штете настаје директним ефектима (32); и
2. Индиректни ефекат (радиолиза воде) на ћелију- када је настајање слободних радикала последица интеракције зрачења са водом која чини 80% ћелије.

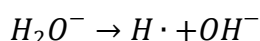
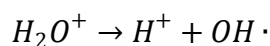


Односно настаје позитивно наелектрисан јон воде и један слободан електрон.

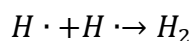
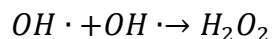
Овај слободни електрон даље интерагује са другим молекулом воде:



Овако настали молекули се распадају на



Чиме се добијају H^+ и OH^- јони. Ова два јона поново рекомбинацијом чине молекулу воде. Међутим ови јони су слободни радикали, и могу се рекомбиновати са другим слободним радикалима или другим молекулима у реакцијама

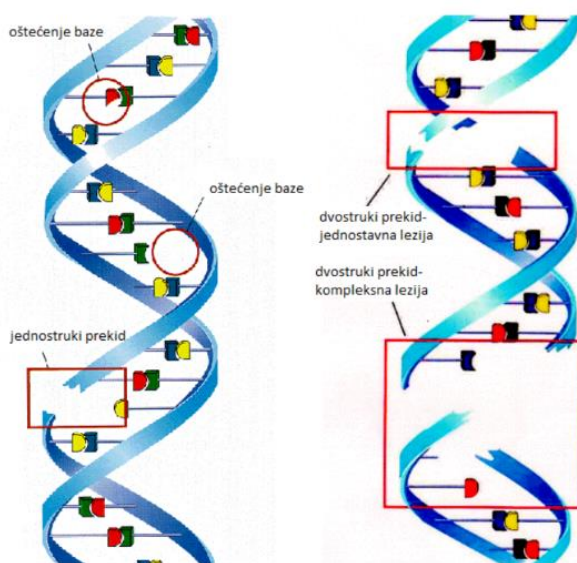


Водоник пероксид се не може кретати дифузијом с једног на друго место у ћелији, оксидише средину у којој се налази и спречава исхрану суседних ћелија и ткива. Његово присуство доводи до смрти ћелије због немогућности исхране. (32)

Осим ова два једињења, реакцијом слободних радикала Н и О₂ настаје водоник диоксид, који има реактиван и дуг живот, због чега и има могућност да дифузијом доспе на друга места у ћелији и тамо ступа у интеракције са великим молекулима. Та особина овог слободног радикала долази до изражаја у ткивима обогаћеним кисеоником. Проласком јонизујућег зрачења кроз ткива богата кисеоником ствара се много већа биолошка штета због настанка овог радикала, него у случају када је присуство кисеоника умањено. (32)

Основна су три типа оштећења ДНК:

1. Оштећење базе, што за последицу може имати оштећење генетског кода и последично генетску мутацију
2. Прекид једног ланца (који настаје када је ДНК изложен зрачењу са малим линеарним енергијским трансфером, ДНК се опорави)
3. Прекид оба ланца (настаје деловањем зрачења са великим линеарним трансфером, ДНК се тешко може опоравити)



Илустрација 6.1 Једноструки прекид ДНК ланца (лево) и двоструки прекид ДНК ланца (десно)

Како је ДНК велики молекул, он за јонизујуће зрачење представља лаку мету, а за ћелијску функцију је од изузетног значаја. Зато последица трајног оштећења ДНК молекула често може бити летална за ћелију. (31,32)

6.1 Ћелијска смрт након озрачивања

Ћелијска смрт изједначена је са процесима који доводе до трајног губитка репродуктивне способности. Врсте ћелијске смрти се могу дефинисати као:

1. Апоптоза- процес који се покреће унутар ћелије након оштећења ДНК молекула или из других сигнала од околног ткива или имуних ћелија. У суштини, представља важну ћелијску одбрану од настанка малигних ћелија и представља самоубиство ћелије.
2. Аутофагија- сам израз знаћи самопрождирање, а подразумева природни регулисани деструктивни механизамтоком којег се разграђују непотребне или нефункционалне ћелијске компоненте.
3. Некроза- смрт ћелије узрокована повредом
4. Сенесценција- смрт узрокована старошћу ћелије. Нормална ћелија током времена губи способност дељења. Ћелија остаје жива, функционална и метаболички непромењена. (31,32)

6.2 Ефекти јонизујућег зрачења на људску популацију

Када је реч о ефектима јонизујућег зрачења зрачења на људску популацију, разликујемо ефекте који се јављају након неколико сати или дана (акутни или рани ефекти), или након неколико месеци или година (хронични или касни ефекти).

Акутни ефекти на организам се појављују у виду инфламације, едема, хеморагије, док касни ефекти подразумевају појаву фиброзе, улцерације, стенозе, опструкције танких црева итд.

Ефекти јонизујућег зрачења могу се класификовати као соматски или генетски.

Код соматских ефеката изложена особа ће осећати последице зрачења до краја свог живота, а у њих спадају: канцерогенеза (појава малигнитета изазвана озрачивањем), стерилност, замућење очног сочива и скраћивање живота.

Генетски или наследни ефекти су мутације у генетском материјалу особе, које могу довести до рођења наредних генерација са неким од дефеката. (32)

Штетни ефекти зрачења могу се поделити на

1. Стохастичке, чија вероватноћа појаве ефекта расте са порастом дозе, али величина ефекта не зависи од дозе- карценогенеза и генетски ефекти. Не постоји праг за појаву ефекта који су стохастички, јер се они јављају у једној

ћелији и сматра се да увек постоји макар и најмања вероватноћа да ће се догађај десити и при малим дозама. (32)

2. Детерминистички ефекти, који представљају реакције ткива, су они који расту са повећањем дозе, најчешће преласком преко прага минималне дозе за дати орган (фиброза, замућење сочива, промене у крвној слици). Ово су промене које се дешавају на популацији ћелија, па је зато потребна минимална доза за појаву ових ефеката. (32)

7 Методе детекције зрачења и интеракција са материјом

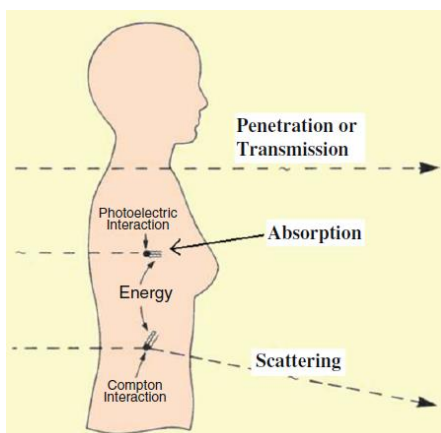
Разумевање интеракције гама зрачења са материјом је веома важна, јер представља дејство гама зрака на људска ткива, па и сам организам (33).

Када гама зрак пролази кроз медијум, у самом медијуму долази до интеракције између фотона и материје која резултује предавањем енергије медијуму. Интеракција може резултовати делчимичним преносом енергије или потпуном њеном апсорпцијом. Међутим, већа је вероватноћа да ће се гама фотон расејати и предати део своје енергије него да ће бити апсорбован (33).

Гама фотон предаје део своје енергије атомима и молекулима који граде ћелије. Ћелије изграђују ткива, даље органе и системе органа, па су самим тим, органи изложени интеракцијом са гама фотоном (33).

Када гама фотон прође кроз неку средину, могућа са три исхода (илустрација 7.1):

1. Може да продре кроз материју без интеракције;
2. Може да буде потпуно апсорбован у средини;
3. Може да се расеје мењајући свој првобитни правац и преда део своје енергије (33).



Илустрација 7.1 Могуће интеракције гама фотона са материјом приликом проласка кроз људски организам

7.1 Интеракције фотона са материјом

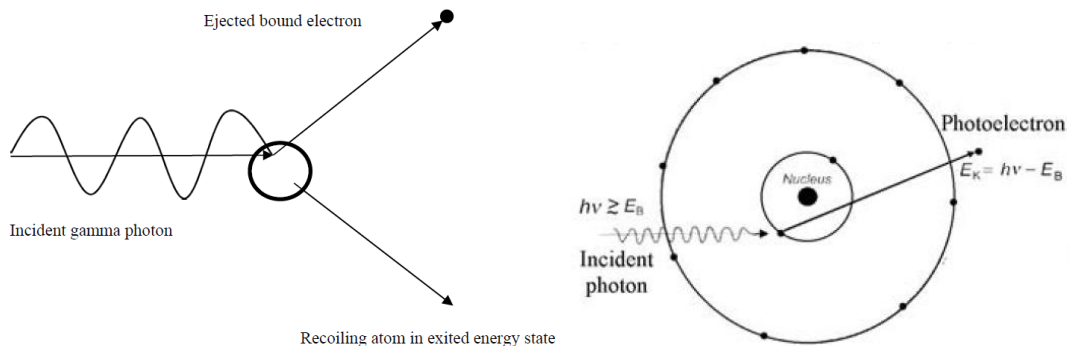
Постоји пет начина или механизма преко којих фотони могу да интерагују са материјом. То су: фотоелектрична апсорпција (фотоэффект), Комптоново расејање, процес производње парова, Рејлијево (кохерентно) расејање и фотодезинтеграција (33,34).

Релативна важност Комптоновог расејања, фотоелектричне апсорпције и производње парова зависи и од квантне енергије фотона и од атомског броја апсорбујуће средине.

7.1.1 Фотоелектрични ефекат

Фотоелектрична апсорпција или ефекат је најважнија интеракција фотона ниске енергије са материјом. Овај ефекат је доминантан за фотоне енергије у опсегу од 0–0,5 MeV (33,34).

Када фотон ступи у интеракцију са материјом, он предаје сву своју енергију у циљу избацивања електрона из атома. Инцидентни фотон потпуно предаје сву своју енергију и нестаје. Предата енергија се појављује у два облика. Део ове енергије се користи за одвајање или избацивање електрона. Ова енергија се зове радна функција материјала (излазни рад). Преостала енергија упадног фотона представља кинетичку енергију електрона. Избачени електрон се назива фотоелектрон (илустрација 7.2) (33,34).



Илустрација 7.2 Фотоэффект

Пошто инцидентни фотон преноси своју енергије у два дела, фотоэффект може бити представљен следећом математичком релацијом:

$$h\nu = \Phi + T \quad \text{Релација 7.1}$$

где је h Планкова константа, $h\nu$ је енергија упадног фотона, Φ је радна функција материјала, а T је кинетичка енергија избаченог фотоелектрона (33,34).

Фотоелектрични пресек τ или вероватноћа појаве фотоелектричног ефекта зависи од енергије упадног фотона као и од атомског броја Z материјала који интерагује са фотоном.

Како се енергија фотона смањује, вероватноћа за фотоелектрични ефекат или фотоелектрични пресек τ се брзо повећава. Енергетска зависност пресека фотоелектричног ефекта је између E^{-2} и E^{-4} . Зависност од атомског броја Z , енергије фотона E вероватноће појаве фотоэффекта дата је релацијом:

$$\tau \propto Z^n E^{-3} \quad \text{Релација 7.2.1.}$$

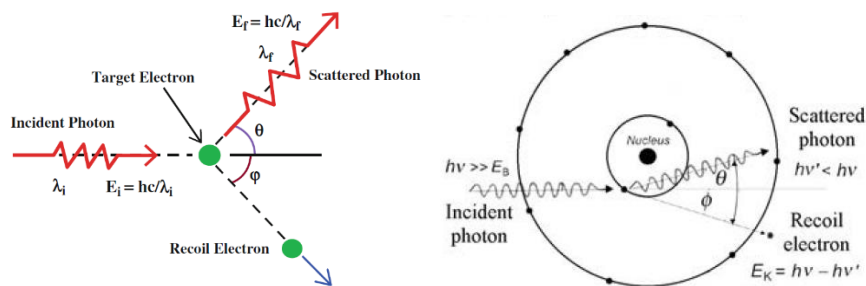
$$\tau \propto \frac{Z^5}{(h\nu)^3} \quad \text{Релација 7.2.2.}$$

где експонент n варира између 3 и 4 у зависности од енергије гама зрака (33,34).

7.1.2 Комптонов ефекат

Комптоново расејање је најважнија интеракција у терапијској и у дијагностичкој медицинској физици. За материјале са ниским Z као што су ваздух, вода и људска ткива, Комптоново расејање се доминантно јавља у опсегу енергија 100 keV–30 MeV. У материјалима са високим Z , његов доминантни енергетски опсег је 0,5 MeV–10 MeV (33,34).

Комптонов ефекат настаје када фотони у упадном снопу γ зрака ступају у интеракцију са слободним или слабо везаним електронима. У овом некохерентном расејању, сви атомски електрони делују независно један од другог. Код Комптоновог расејања, један фотон удари у електрон, дајући део своје енергије и импулса електрону. Овај електрон је стационаран или скоро стационаран и назива се метом. Као резултат, фотон се расејава, скреће са првобитног правца, са смањеном енергијом и већом таласном дужином. Разлика у енергији фотона пре и после расејања представља кинетичку енергију електрона. Овај електрон се назива повратни електрон. Ако снопови фотона ступају у интеракцију са материјом или телесним ткивима, тада је и одређени број фотона расејан на електронима атома који чине материју или ткива. Као резултат, долази до слабљења снопа. Штавише, јонизација атома се такође јавља као резултат таквог расејања. Почетни фотон енергије E_i , импулса p_i и таласне дужине λ_i има много већу енергију од енергије везивања електрона. Када се фотон судари са електроном, електрон прима енергију од фотона и емитује се под углом ϕ . Фотон таласне дужине λ_f је расејан под углом θ (илустрација 7.3) (33,34).



Илустрација 7.3 Комптонов ефекат

Са обзиром на то, да фотон при Комптоновом расејању мења таласну дужину и енергију, укључујући закон одржања енергије и закон одржања импулса, Комптонов ефекат се може представити релацијама:

$$\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = h(1 - \cos \theta)/mc \quad \text{Релација 7.3}$$

$$E_f = E_i \left[1 + \frac{hv_i}{mc^2} (1 - \cos \theta) \right]^{-1} \quad \text{Релација 7.4}$$

где је m маса мировања електрона. Термин $\Delta\lambda$ се назива промена таласне дужине и једнака је разлици таласне дужине фотона после и пре расејања, а h је Планкова константа (33,34).

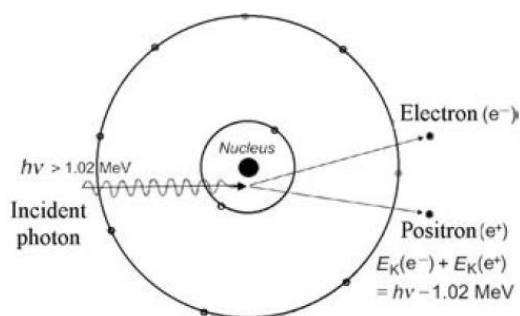
Вероватноћа појаве Комптоновог расејања σ полако варира са атомским бројем Z материјала у интеракцији. Математички:

$$\sigma \propto Z \quad \text{Релација 7.5}$$

7.1.3 Процес производње парова

Производња пара је доминантна у интеракцијама фотона више енергије са материјом (33,34).

У овом феномену, γ фотон који пролази близу језгра атома подлеже јаким ефектима поља из језгра и цепа се у електрон-позитрон пар. Уопштено говорећи, негативно наелектрисани електрон (e^-) и позитивно наелектрисани позитрон (e^+) настају од фотона који је у интеракцији са електромагнетним пољем (илустрација 7.4), док су енергија и импулс одржани. Пошто електрон (e^-) и позитрон (e^+) поседује природу честица и учествује у изградњи материје, стога се производња у пару назива и „материјализација енергије“ (33,34).



Илустрација 7.4 Процес производње парова

Фотон треба да има најмање 1,022 MeV или више енергије да учествује у овом процесу, што је збир енергија масе мировања електрона (0,511 MeV) и позитрона (0,511 MeV). Ако је енергија фотона већа од збира масе мировања енергије и електрона и позитрона, тада преосталу енергију преузимају електрон и позитрон као њихове кинетичке енергије. Математички (33,34):

$$h\nu = 1,022 \text{ MeV} + KE_{e^-} + KE_{e^+} \quad \text{Релација 7.6}$$

Да би се очувао импулс, електрон и позитрон морају да се крећу у супротном смеру након стварања. Штавише, производња парова доминира над фотоефектом и Комптоновим расејањем када је енергија фотона већа од 10 MeV. Електрон-позитрон пар не постоји дуго као такав, већ се позитрон и електрон рекомбинују кроз процес који се зове анихилација. У процесу анихилације, електрон и позитрон се комбинују један са другим, нестају и стварају два γ -зрака фотона сваки са енергијом од 0,511 MeV. Два фотона се крећу супротно један од другог (33,34).

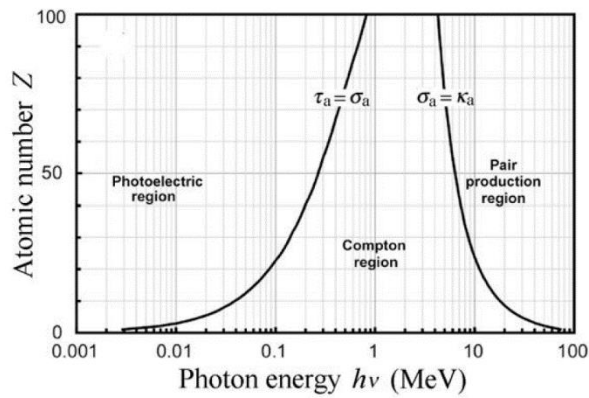
Вероватноћа овог ефекта расте са повећањем атомског броја због чињенице да је производња пара узрокована интеракцијом са електромагнетним пољем језгра. Вероватноћа настанка пара κ варира са атомским бројем Z материјала на следећи начин:

$$\kappa \propto Z^2 \quad \text{Релација 7.7}$$

Вероватноћа интеракције μ , гама фотона са материјом код сва три процеса је једноставно збир сваке појединачне вероватноће појаве што је дато као (33,34):

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad \text{Релација 7.8}$$

Вероватноћа да фотон прође кроз било коју од различитих интеракционих појава зависи од енергије $h\nu$ фотона и од атомског броја Z апсорбера. Генерално, фотоелектрични ефекат преовлађује при ниским енергијама фотона, Комптонов ефекат на средњим енергијама и производња парова при високим енергијама фотона (илустрација 7.5) (33,34).



Илустрација 7.5 График зависности интеракције фотона са материјом од атомског броја материје и енергије фотона

7.2 Методе детекције гама зрачења

Да би гама зрак био детектован, он мора да ступи у интеракцију са материјом, а та интеракција мора бити забележена. Кључни процес којим се детектује гама зрак је јонизација, где он предаје део или целу своју енергију електрону. Слободни електрони се сударају са другим атомима и ослобађају много више електрона. Ослобођено наелектрисање се прикупља, било директно или индиректно, да би се регистровало присуство гама фотона и измерила његова енергија. Коначни резултат је електрични импулс чији је напон пропорционалан енергији депонованој у детекторском медијуму (35).

При недеструктивним тестовима, обично је потребно измерити не само количину зрачења које излази из узорка, већ и његов енергетски спектар. Дакле, детектори који се најчешће користе у недеструктивним методама су они чији су излазни сигнали пропорционални енергији коју гама зраци депонују у осетљивој запремини детектора .

За детекцију гама зрака, користе се гасни детектори, сцинтилациони детектори и полупроводнички детектори. За израду овог рада, потребно је коментарисати тзв. HPGe³⁴ детекторе који спадају у полупроводничке детекторе, тако да гасни и јонизациони детектори неће бити разматрани.

³⁴ High Purity Germanium

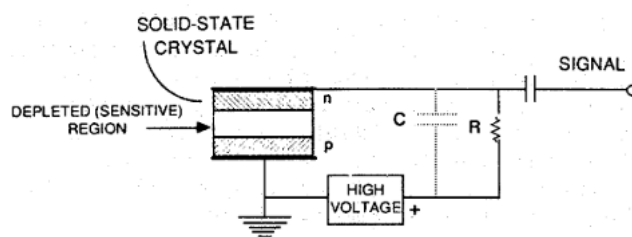
7.3 Полупроводнички детектори

У полупроводничким детекторима наелектрисање произведено интеракцијама фотона се прикупља директно.

Осетљива запремина је област у полупроводничком материјалу у којој се ослобођени електрони и шупљине слободно крећу. Германијум поседује најидеалније карактеристике у овом погледу и најчешће је коришћен полупроводнички материјал у детекторима.

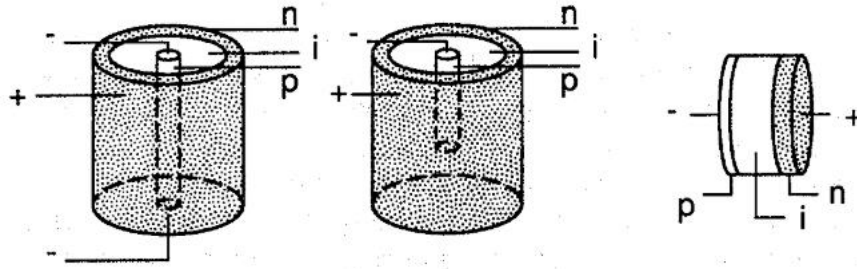
Детектор функционише као пропорционални бројач у чврстом стању, са јонизационим наелектрисањем које се директно води на електроде високом електричном пољу којим је изложен, произведеног преднапоном (илустрација 7.6). Прикупљено наелектрисање се претвара у напонски импулс помоћу претпојачавача. Најпопуларнији рани дизајни користили су германијум са литијумом [GeLi] као медијум за детекцију. Литијум је служио да инхибира хватање наелектрисања на местима нечистоћа у кристалној решетци током процеса сакупљања наелектрисања. Последњих година, произвођачи су произвели кристале од хиперчистог германијума (HPGe³⁵), у суштини елиминишући потребу за допингом литијумом и поједностављујући рад детектора (35).

Полупроводнички детектори се производе углавном у две конфигурације: планарни и коаксијални. Ови термини се односе на облик кристала детектора и начин на који се исти спаја у коло детектора. Коаксијални детектори се производе са отвореним (такозвани прави коаксијални) или са затвореним кристалима (илустрација 7.7). У оба случаја електрично поље за прикупљање наелектрисања је првенствено радијално, са неком аксијалном компонентом присутном у затвореној конфигурацији. Коаксијални детектори се могу произвести са великим осетљивим запреминама и стога са великом ефикасношћу детекције при високим енергијама гама зрака (35).



Илустрација 7.6 Шема полупроводничког детектора

³⁵ Hyperpure germanium

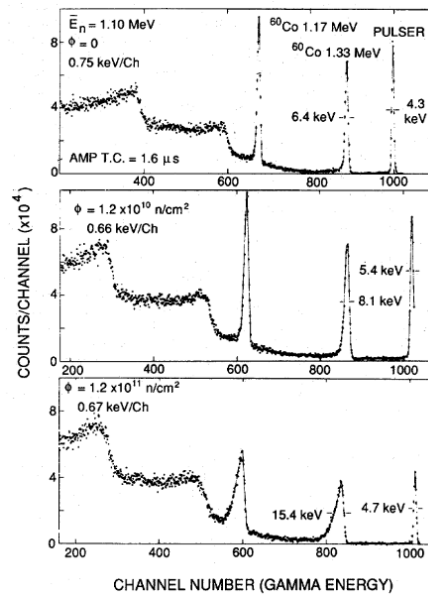


Илустрација 7.7 Коаксијални отворени (а), коаксијални затворени (b) и планарни (c)

Електрично поље је нормално на површину попречног пресека кристала. Дебљина кристала се бира на основу енергетског опсега гама зрака релевантног за примену, са малим дебљинама оптималним за нискоенергетска мерења. Планарни детектори обично постижу најбољу енергетску резолуцију (због своје ниске капацитивности) па су пожељни за детаљну спектроскопију, као што је анализа комплексних нискоенергетских гама-зрака.

Због своје високе резолуције, полупроводнички детектори су релативно осетљиви на деградацију перформанси услед оштећења зрачењем. Количина оштећења настала у детекторском кристалу по јединици упадног флукса је највећа за неутронско зрачење. У срединама где су нивои неутрона високи (као што су акцелератори, реактори или инструменти са интензивним изворима неутрона), примећени су најзначајнији ефекти штетног зрачења. Штавише, ефекти оштећења радијацијом могу бити забрињавајући у недеструктивним апликацијама где се велике количине нуклеарног материјала континуирано мере опремом за гама спектроскопију високе резолуције (35).

Примарни ефекат оштећења зрачењем је стварање дислокацијских места у детекторском кристалу. Ово повећава количину хватања наелектрисања, смањује амплитуде неких пулсева пуне енергије и производи нискоенергетске репове у фотоврху спектра. У ствари, резолуција је деградирана, а детаљи спектра се губе (илустрација 7.8) (35).



Илустрација 7.8 Погоршање гама спектра полупроводничког детектора високе резолуције са повећањем флуенса неутрона

Генерално је примећено да значајна деградација перформанси почиње са флуksom неутрона од приближно 10^9 n/cm², а детектори постају неупотребљиви при флуксу од приближно 10^{10} n/cm². Међутим, нови кристали HPGe n-типа су очигледно мање подложни оштећењу неутрона (35).

У стању мировања, конфигурација диоде обрнутог преднапона чистог германијума доводи до веома ниских струја у детектору (обично у опсегу пико до наноампера). Ова струја цурења може се даље смањити са своје вредности на собној температури криогеним хлађењем медијума, типично до температуре течног азота (77 K). Хлађење смањује шум у кристалу, али представља главни недостатак таквих детектора: пакет детектора мора да садржи капацитет за хлађење, а то обично укључује вакуумску посуду за држање течног расхладног средства³⁶ (35).

³⁶ Последњих година направљени су покушаји да се материјал детектора охлади електронски али ови напори су још увек у експерименталним фазама, а способност тек почиње да буде комерцијално доступна

7.4 Карактеристике детектованог спектра

У применама спектроскопије гама зрака, детектори производе излазне импулсе чије су величине пропорционалне енергији депонованој у медијуму за детекцију од стране упадних фотона. Мерни систем укључује метод сортирања свих генерисаних импулса и приказивања њихових релативних бројева. Основни алат за остваривање овог задатка је вишеканални анализатор. Крајњи резултат вишеканалне анализе је спектар детектованих излазних импулса, сортираних по интензитету. Спектар висине импулса је директан приказ енергетског спектра интеракција гама зрака у медијуму за детекцију и чини спектроскопску информацију.

7.4.1 Генерички одговор детектора

Без обзира на тип детектора који се користи, измерени спектри имају многе карактеристике заједничко. Размотримо спектар моноенергетског извора енергије гама зрака E_0 . Фотони гама зрака потичу из нуклеарних прелаза који укључују специфичне енергетске промене. Постоји веома мала флукуација у овим енергетским вредностима због два ефекта:

1. квантне несигурности у енергијама прелаза (тзв. Хајзенбергова несигурност)
2. ефекта узмака због емисије гама фотона (35).

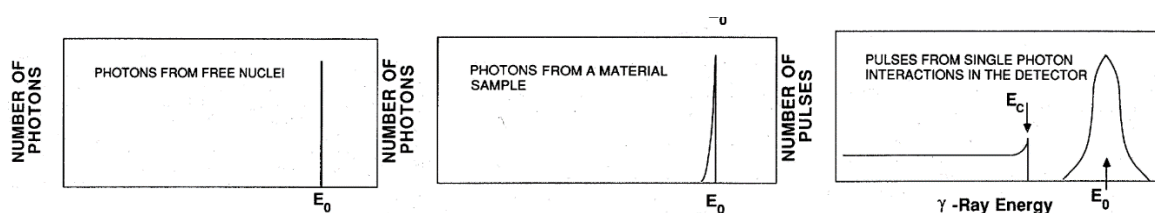
Ове несигурности су коначне, али занемарљиве. Дакле, идеалан моноенергетски спектар гама зрака из слободних распадајућих језгара је у суштини оштра линија на енергији E_0 (илустрација 7.9.а).

Пошто детектовани фотони гама зрака обично не долазе из слободних језгара, али јесу емитовани у материјалним медијума, неки од њих се расејавају пре него што изађу из мереног узорка. Ово расејање оставља фотоне са нешто мање енергије од E_0 , а енергетски спектар фотона емитованих из узорка материјала је благо проширен на енергије испод E_0 (илустрација 7.9 b) (35).

Када гама зрак уђе у медијум за детекцију, он преноси део или целу своју енергију атомском електрону, ослобађајући електрон из атома. Овај ослобођени електрон тада обично преноси своју кинетичку енергију, у низу судара, на друге атомске електроне у медијуму детектора.

Количина енергије потребна за производњу електрон-јонских парова у детекторском медијуму одређује количину наелектрисања која ће се произвести из догађаја који укључује

дату количину депоноване енергије. Фотоелектрична интеракција преноси сву енергију упадног фотона на фотоелектрон, који касније изазива вишеструке јонизације све док се његова енергија не исцрпи. Количина наелектрисања произведена из ове врсте догађаја је стога пропорционална стварној енергији фотона. Комтоновим расејањем преноси се део енергије упадног фотона на јонизовани електрон, а тај електрон накнадно изазива јонизације све док се његова енергија не исцрпи. Количина наелектрисања произведена из ове врсте догађаја је пропорционална делимичној енергији коју је првобитно изгубио упадни фотон, али не преноси никакве корисне информације о стварној енергији фотона. Вишеструки догађаји Комптоновог расејања за један фотон могу произвести количине наелектрисања ближе вредности која представља пуну енергију оригиналног фотона, међутим, сигнали које производи Комптоново расејање генерално представљају једну интеракцију расејања и мањи су по величини од сигнала пуне енергије. Максимална енергија која се може депоновати у медијуму за детекцију од догађаја расејања по Комтону долази од догађаја где се фотон расејава за 180° . Комптонски генерисани детекторски импулси су стога распоређени испод ове максималне енергије и представљају извор „позадинских“ импулса који не носе корисне информације о енергији (илустрација 7.9 c) (35).



Илустрација 7.9 Идеализован спектар фотона (a) произведен од слободних нуклеона, (b) произведен од слободних језгара и (c) произведен од интеракција у медијуму

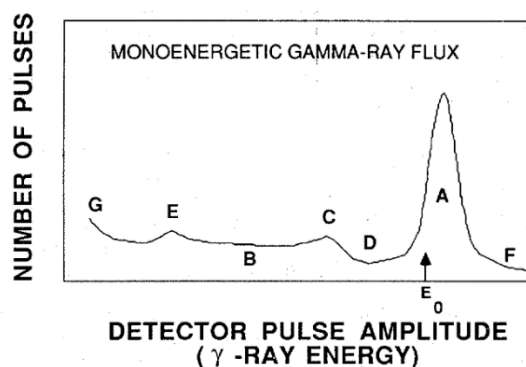
7.4.2 Карактеристике спектра

Постоји неколико карактеристика спектра:

1. Фотопик или врх пуне апсорпције- Овај врх представља импулсе који настају фотоелектричним ефектом у медијуму за детекцију. Неки доприноси фотопику такође произилазе из једне или вишеструких Комптонових интеракција које су праћене фотоелектричним ефектом. Његова ширина је првенствено одређена статистичким флукуацијама у наелектрисању произведеном од интеракција плус допринос електронике за обраду импулса. Њена центроида представља енергију фотона E_0 . Његова нето површина изнад позадине представља укупан број

- интеракција пуне енергије у детектору и обично је пропорционална маси изотопа који емитује (илустрација 7.10 А) (35).
2. Комптонов позадински континуум- Ови импулси, распоређени континуално до максималне енергије E_c , потичу од интеракција које укључују само делимичан губитак енергије фотона у медијуму за детекцију. Комптонове интеракције су примарни извор позадинског зрачења испод пикова пуне енергије у сложенијим спектрима (илустрација 7.10 В) (35).
 3. Комптонова ивица- Ово је област спектра која представља максимални губитак енергије упадног фотона кроз Комптоново расејање. То је широки асиметрични пик који одговара максималној енергији (E_c) коју гама фотон енергије E_0 може пренети слободном електрону у једном догађају расејања. Ово одговара „директном“ судару између фотона и електрона, где се електрон креће напред, а гама фотон се расејава уназад, т.ј. за угао од 180° (илустрација 7.10 С) (35).
 4. Комптонова долина- За моноенергетски извор, импулси у овом региону настају или из вишеструких догађаја Комптоновог расејања или из интеракција пуне енергије фотона који су прошли расејање под малим углом (било у изворним материјалима или материјалима који се налазе пре уласка у детектор). Нерасејани фотони из моноенергетског извора не могу произвести импулсе у овој области из једне интеракције у детектору. У сложенијим спектрима, овај регион може да садржи импулсе које генерише Комптоново расејање фотона више енергије (илустрација 7.10 D) (35).
 5. Пик позадинског расејања- Овај врх је узрокован гама зрацима који су интераговали Комптоновим расејањем у неком од материјала који окружују детектор. Гама зраци расејани за више од 110° - 120° ће се појавити са скоро идентичним енергијама у опсегу од 200 до 250 keV. Према томе, моноенергетски извор ће довести до многих расејаних гама зрака чија је енергија близу ове минималне вредности (илустрација 7.10 Е) (35).
 6. Регија вишка енергије- Иако је моноенергетски извор, догађаји у овом региону потичу од високоенергетских гама зрака и миона космичких зрака у природном позадинском зрачењу и од догађаја нагомилавања импулса ако је брзина бројања довољно висока. У сложенијем спектру, импулси изнад датог фотопика су првенствено Комптоново расејање гама зрака више енергије (илустрација 7.10 G) (35).

7. Нискоенергетски део- Ова карактеристика спектра, веома близу области „нулте пулсне висине и амплитуде“, обично произилази из електронског шума мале амплитуде у систему за детекцију. Овај шум има тенденцију да буде на прилично високој фреквенцији и тако се појављује као феномен високе брзине бројања. Електронски шум се обично електронски филтрира, тако да овај ефекат обично не доминира приказаним спектром. У сложенијим спектрима гама зрака, који садрже много различитих енергија фотона, карактеристике врха комптонове ивице и повратног расејања имају тенденцију да „исперу“ излаз остављајући првенствено пикове пуне енергије на релативно глаткој комптонској позадини (илустрација 7.10 F) (35).



Илустрација 7.10 Реалистичан приказ гама спетра моноенергетског извора гама зрака са наведеним карактеристикама спектра

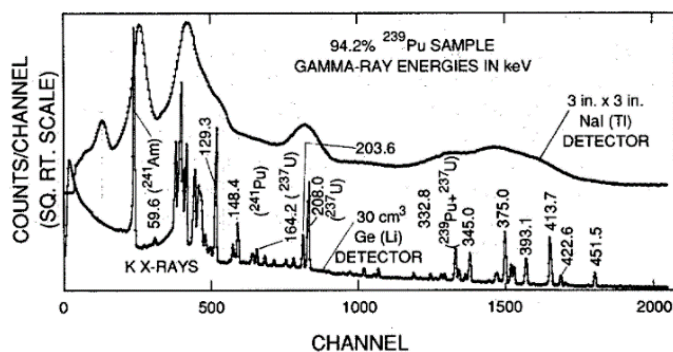
7.4.3 Резолуција детектора

Резолуција детектора је мера његове способности да раздвоји два фотопика која су блиска по енергији (35). Параметар који се користи за спецификацију резолуције детектора је ширина фотопика на половини његове максималне висине ($FWHM^{37}$). Ако се претпостави стандардни Гаусов облик за фотопик, $FWHM$ је дат са:

$$FWHM = 2\sigma\sqrt{\ln 2} \quad \text{Релација 7.9}$$

где је σ параметар ширине за Гаусијан. Висока резолуција (мала $FWHM$) не само да олакшава индивидуалну дефиницију блиских фотопикова, већ и чини одузимање Комптоновог континуума мање несигурним јер је то мањи део укупне активности у области фотопикова (илустрација 7.11).

³⁷ Full Width Half Max



Илустрација 7.11 Разлика пикова два енергетска спектра

7.4.4 Ефикасност детектора

Основна дефиниција апсолутне ефикасности детекције фотона је:

$$\epsilon_t = \frac{\text{укупан број детектованих фотона у пуном пику енергије}}{\text{укупан број фотона које је емитовао извор}} \quad \text{Релација 7.10}$$

Ова укупна ефикасност се може изразити као производ четири чиниоца:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{geom} \epsilon_{aps} \epsilon_{samp} \epsilon_{int} \quad \text{Релација 7.11}$$

Геометријска ефикасност ϵ_{geom} је део емитованих фотона који су пресретнути детектором. За тачкасти извор ово је дато помоћу:

$$\epsilon_{geom} = \frac{A}{(4\pi r^2)} \quad \text{Релација 7.12}$$

где је A површина попречног пресека детектора, а r растојање између извора и детектора (35). Овај фактор је у суштини независан од енергије фотона. Он манифестује добро познати закон инверзног квадрата за брзину бројања као функцију удаљености од извора до детектора.

Ефикасност узима у обзир ефекте материјала који се налазе у детекторском систему (као што је кућиште детектора, специјални апсорбери, итд.) који апсорбују део упадног зрачења пре него што ступи у интеракцију са активном запремином детектора (35). Овај термин је посебно важан (пожељно је да буде $\ll 1$) за фотоне ниске енергије код којих су ефекти апсорпције најизраженији. Има математички облик:

$$\epsilon_{aps} = \exp \left[- \sum \mu_i (E_\gamma) \rho_i \chi_i \right] \quad \text{Релација 7.13}$$

где су μ_i , ρ_i и χ_i су коефицијент апсорпције масе, густина и дебљина i -тог материјала, а сумирање се врши на свим врстама материјала.

Интринзична ефикасност је вероватноћа да ће гама зрак који улази у детектор реаговати и дати пулс пуне енергије. Најједноставније речено, ова ефикасност долази од стандардне формуле апсорпције:

$$\varepsilon_{int} = 1 - \exp(-\mu r \chi) \quad \text{Релација 7.14}$$

где је μ коефицијент слабљења, а ρ и χ су густина и дебљина материјалаактивне запремине детектора. Овај једноставан израз потцењује праву интринзичну ефикасност јер пик пуне енергије такође може да садржи догађаје из вишеструких интеракција Комптоновог расејања (35).

Још један битан део ефикасности је релативна ефикасност са две конотације:

1. Релативна према NaI: Пракса је да се одреди ефикасност германијумско детектора на 1332 keV (^{60}Co) као проценат ефикасности NaI детектора од 3x3 инча на удаљености од 25cm извор-детектор (35)
2. Релативна крива ефикасности (тзв. интринзична калибрација ефикасности): Ово је композитна крива енергетске зависности односа детектоване брзине бројања и емитоване брзине бројања.

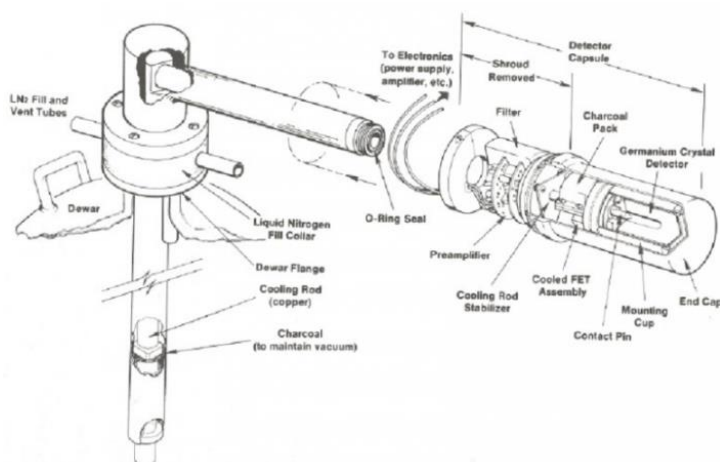
7.5 HPGe детектори

Већина детектора је произведена од кристала германијума високе чистоће, који је механички обликован у цилиндар различитих димензија. Кристал германијума генерише слободне електроне као одговор на апсорбовање енергије јонизујућег зрачења. Кристал се понаша као полупроводник кроз који се пропушта високи напон обрнутог преднапона криогене температуре.

Под овим условима, наелектрисање (електрони шупљине) настају апсорпцијом гама зрака, потом се усмеравају на посебне контакте на супротним странама кристала, у јаком електричном пољу. Резултујући електрични импулс се интегрише помоћу појачавача који производи излазни напон, чија је висина импулса пропорционална енергији упадног фотона.

Облик, положај и дебљина контакта одређује „конфигурацију“ детектора и његову погодност за употребу у мерење радионуклида одређеног енергетског опсега. Модерни детектори су прављени у коаксијалној геометрији, којом је обезбеђена велика активна запремина. Тиме се подразумева да је кристал цилиндричног облика и да су п и н спојеви постављени коаксијално. У зависности од тога који је слој ближи детектору, п или н, имамо п тип детектора и н тип детектора, а у зависности од геометрије, разликујемо детекторе

отвореног, затвореног типа или тип бунара. Следећа илустрација приказује један тип детектора.



Илустрација 7.12 Шема HPGe детектора

Према илустрацији, детектор је постављен на крају бакарне жице, а док се други њен крај налази у посуди напуњеној течним азотом. Овим се обезбеђује потребно хлађење детектора, како је већ споменуто раније. Због смањења електронског шума и ефикасног хлађења, претпојачавач се поставља што ближе детектору.

Основне карактеристике детектора су:

Осетљивост детектора-представља способност детектора да произведе чист сигнал за дато зрачење и зависи од:

1. Пресека јонизујућих интеракција у детектору;
2. Сопственог шума детектора- сигнал који се детектује мора бити јачи од шума како би био детектован;
3. Заштитног материјала око активне запремине- одређује доњу границу енергије која ће бити детектована;
4. Маса кристала- пропорционална је вероватноћи јонизације унутар детектора.
5. Одзива детектора- представља зависност јачине излазног сигнала од енергије зрачења и у идеалном случају, зависност је линеарна или приближно линеарна за одређен спектар енергија.
6. Енергетске резолуције- функције депоноване енергије унутар осетљиве запремине. Експериментално је доказано да како расте енергија расте и број јонизација. Резолуција је дата у виду FWHM (видети поглавље 7.4.3). На квалитет резолуције могу да утичу следећи фактори:

- a. Ефикасност детектора- однос брзине бројања и брзине емитовања фотона (видети поглавље 7.4.4)
- b. Временска резолуција- време потребно да се генерише сигнал након интеракције. У овом временском интервалу, нема регистровања других интеракција, док се не обради прва интеракција. Овим се ограничава права слика о стварном броју упадних фотона.
- c. Мртво време- временски интервал потребан да детектор обради догађај и једнак је времену трајања сигнала. Код германијумских детектора, свака информација о фотону који се нађе унутар детектора у току мртвог времена је изгубљена.

7.5.1 Калибрација детектора

Калибрацији детектора у зависности од мереног узорка, може се приступити на више начина:

1. Експериментални метод калибрације- Под овим се подразумева одређивање односа детектованих фотона емитованих из извора познатог састава и активности:

$$\varepsilon_t = \frac{N}{A \cdot P_\gamma \cdot t} \quad \text{Релација 7.15}$$

где је N број детектованих фотона, A активност извора фотона у тренутку мерења, P_γ вероватноћа емисије фотона и t је временски интервал мерења. Уколико извор садржи различите радионуклиде који емитују зрачење различитих енергија, одређује се функционална зависност ефикасности од енергије, потом се одређује ефикасност за све друге енергије по потреби (36). Ефикасност зависи од матрикса и геометрије мереног узорка. Матрикс утиче на масени атенуациони коефицијент, а геометрија и положај извора у односу на детектор, утиче на просторни угао под којим се види извор. Услов приступању експерименталног метода калибрације је коришћење стандардних радиоактивних материјала, који су по хемијском саставу, густини и геометрији слични узорцима који се мере (36).

2. Аналитички метод- Аналитичком методом калибрације се приступа уколико се ефикасност детектора различитих геометрија представља као функција запремине и положаја узорка на детектор, тј. геометрије мерења, коришћењем

искључиво математичких модела. У овом случају се такође узима у обзир самоапсорпција у матриксу, док се зависност коефицијента самоапсорпције од материјала представља константом која се одређује фитовањем (36).

3. Полуемпиријски метод- Уколико извор није познате геометрије, или је нетачкасти извор, мора се прибећи другачијем приступу, путем којег се не прибегава апроксимацијама, које нам омогућавају услови тачкастог извора. Полуемпиријски метод калибрације своди рачунање ефикасности преко одређивања ефективног просторног угла, што је мера вероватноће да фотон емитован из извора интерагује са активном запремином детектора и да у интеракцијама пренесе целу своју енергију материјалу детектора (36).
4. Монте Карло метод- Монте Карло метода је метода која се бави пробабилитичким приступом испитивања, тј. симулација са случајним бројевима. Идеја приступа јесте да се сваки рачун који води до квантитативног резултата схвата као процена вредности вишеструких интеграла. Метода не захтева увек праве случајне бројеве, али захтева да генерисани бројеви буду униформне расподеле или неке друге расподеле задате по интервалу. Линеаризованом транспортном једначином се описује дифузија честица кроз дату средину, њена аналитичка решења су позната само у апроксимацији хомогеног моноенергетског извора бесконачних димензија и апсолутно апсорбујуће средине. Просторна расподела, енергија и правац зрачења се не могу израчунати аналитичким путем. Овим методом на практичан начин се може одредити одзив детектора за произвољну геометрију и за компликована поља зрачења (36).

8 Анализа добијених резултата мерења

8.1 Формирање спектра и анализа спектра

За калибрацију три HPGe детектора, обележених D1, D2 и D3, коришћени су секундарни референтни радиоактивни материјали³⁸.

При мерењу са детекторима D1 и D3 узорак се поставља директно на капу детектора без апсорбера, али код детектора D2, узорак се поставља на полистиренски носач, због заштите берилијумског прозора детектора.

Мерења су вршена у интервалима од 1200 s, 1500 s, 1800 s, 2100 s, 2400 s и 3000 s живог времена мерења.

Снимање и анализа спектра извршена је коришћењем софтверског пакета GENIE2000, прозвођача Canberra (37) који пружа неколико могућности одређивања површине испод фото пика. Коришћењем опције Analyze→Peak Locate→VMS Standard Peak Search Parameters фотопик се фитује најбољим гаусијаном.

Софтвер дефинише површину испод фотопика S:

$$S = G - B \quad \text{Релација 8.1}$$

што представља укупан број детектованих импулса испод целе области дефинисане гаусијаном и B је континуум дефинисан изразом:

$$B = \left(\frac{N}{2n}\right)(B_1 + B_2) \quad \text{Релација 8.2}$$

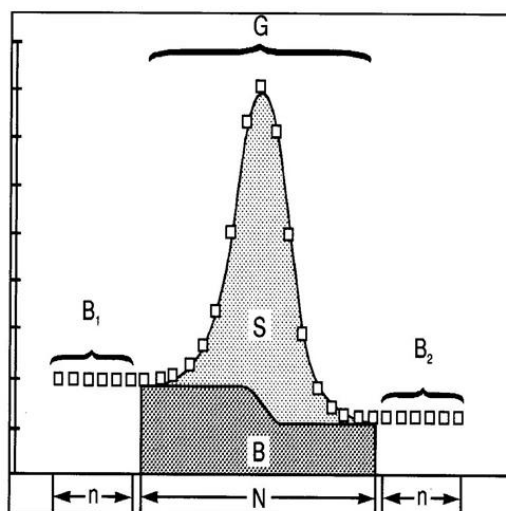
где је N број канала у фотопику, n је број канала лево и десно од пика B₁ и B₂ су суме детектованих импулса у континууму лево и десно од фотопика. Ово је случај тзв. линеарног континуума (илустрација 8.1).

У случају да пик који посматрамо наседа на Комптонову ивицу неког другог фотопика у спектру или из било ког разлога имамо значајно више импулса у једном крилу фотопика у односу на друго, примењује се формула за тзв. степ континуум:

$$B = \sum_{i=1}^N \left(\frac{B_1}{n} + \frac{B_2 - B_1}{nG} \cdot \sum_{j=1}^i y_j \right) \quad \text{Релација 8.3}$$

где је y_i број импулса у i-том каналу.

³⁸ Материјали који омогућавају варирање густине матрикса који се користи за калибрацију ефикасности детектора



Илустрација 8.1 Изглед фотопкиа са степ континуумом

Пре анализирања спектра, на основу мерења секундарног референтног материјала, матрикса угља, приступа се рачунању ефикасности за дате енергије по следећој формули, како је описано у поглављу 7.5.1:

$$\varepsilon = \frac{N \cdot C(E)}{t \cdot P_{\gamma} \cdot A_0 \cdot e^{-\tau/T_{1/2}}} \quad \text{Релација 8.4}$$

где је N површина испод пика (након одузимања спектра бланка) изражена преко броја детектованих импулса, t је време трајања мерења, P_{γ} је вероватноћа емисије фотона дате енергије, $C(E)$ је корекциони фактор за коинцидентно сумирање, A_0 је активност секундарног референтног материјала на датој енергији у тренутку прављења материјала, τ је време у данима протекло од момента прављења секундарног референтног материјала до момента мерења и $T_{1/2}$ је време полураспада радионуклида чију енергију посматрамо.

Како је време полураспада стандардног радиоактивног раствора, коришћеног за прављење секундарног референтног материјала далеко дуже од времена мерења, нису рађене корекције на распад. Корекциони фактори за коинцидентно сумирање рађени су за ^{60}Co , ^{57}Co и ^{88}Y , који емитују два фотона по распаду.

8.2 Мерна несигурност

За сва извршена мерења представља се мерна несигурност, па и код најједноставнијих мерења. За велики број поновљених мерења, врши се њихово усредњавање, а стандардна девијација се узима као мера тачности.

Мерна несигурност се одређује на основу свих релевантних варијабли које се јављају у току припреме и мерења секундарних референтних радиоактивних материјала.

Комбинована стандардна мерна несигурност се добија преко Гаусовог закона о пропагацији грешке.

Проширена мерна несигурност се добија множењем комбиноване стандардне мерне несигурности фактором поверења k_α што значи да је вредност мерене величине у интервалу $y \pm u(y)$ на нивоу поверења једнаким α (36).

Неће све променљиве имати исти допринос комбинованој стандардној мерној несигурности. Из тог разлога се одвајају променљиве које утичу на мерену величину и њихове појединачне мерне несигурности. Разликујемо две врсте променљивих: априори квантификване доприносе мерној несигурности и доприносе који потичу од мерених величина (36).

Априори квантификвани доприноси су:

1. Стабилност мерног система- Врше се мерења на истом детектору под истим условима, па се очекују и исти резултати мерења. Довољно је извршити одређени број понављања једног мерења и узети стандардну девијацију рачуна као меру тог доприноса.
2. Несигурност вероватноће за емисију гама фотона је углавном реда величине 0.1% или мање, па се и овај допринос може занемарити.
3. Несигурност полувремена живота је углавном је заменарљива у односу на друге доприносе.

Доприноси мерној несигурности које потичу од мерених величина су:

1. Несигурност мртвог времена детектора- елиминише се увођењем корекције на мртво време или подешавањем времена мерења на живо време, а не на реално време.
2. Несигурност која потиче од нуклеарног распада елемената у току самог мерења- елиминише се одабирм радионуклида са дугим полувременом живота.
3. Несигурност која потиче од самоапсорпције у матриксу-елиминише се прављењем секундарних референтних материјала.
4. Допринос мерној несигурности који потиче од статистике бројања је највећи и најзначајнији. Претпоставља се да и пик и континуум имају Поасонову расподелу па је несигурност броја импулса у континууму

$$\sigma_G = \sqrt{G}$$

Релација 8.5

$$\sigma_B = \sqrt{\left(\frac{N}{2n}\right)^2 \cdot (B_1 + B_2)} \quad \text{Релација 8.6}$$

$$\sigma_S = \sqrt{G + \left(\frac{N}{2n}\right)^2 \cdot (B_1 + B_2)} \quad \text{Релација 8.7}$$

8.3 Рачунање активности и дозе

Резултати мерења радиоактивног Cs-137, црвеног воћа увезеног у Србију из Европе, приказани су у табелама 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6., где табела 8.1 представља резултате мерења боровнице, а у табели 8.2 су издвојени узорци боровница са измереном активношћу цезијума изнад минималне детектабилне концентрације. Даље у табели 8.3 представљени су резултати мерења узорака брусница, а у табели 8.4 су издвојени узорци са измереном активношћу цезијума изнад минималне детектабилне концентрације и на крају, табела 8.5 представља прикупљене резултате мерења узорака купине, док табела 8.6 издваја узорке у којима је детектован Cs-137.

Концентрација активности у узорцима се израчунава по следећој једначини:

$$A = \frac{N}{t \times P_\gamma \times \varepsilon \times m} \quad \text{Релација 8.8}$$

где је N број детектованих фотона коригован на позадинско зрачење (фон), t – време мерења (s), P_γ – вероватноћа гама распада (%), ε – ефикасност на датогенергији (%), m – маса (kg) узорка.

Минимална детектабилна концентрација се рачуна по формули:

$$MDC = \frac{LLD}{t \times t \times P_\gamma \times \varepsilon \times m} \quad \text{Релација 8.9}$$

где је LLD граница детекције, $LLD = 2,71 + 4,65 \sqrt{B}$, где је B број детектованих фотона у фону.

Могући ризик од јонизујућег зрачења по здравље људи изражава се појединачном годишњом ефективном дозом услед ингестије. Допринос индивидуалној годишњој ефективној дози одраслој особи од козумирања црвеног воћа се може израчунати према (IAEA, 2001) помоћу једначине:

$$E_{ing} = H \times A \times DF_{ing} \quad \text{Релација 8.10}$$

где је E_{ing} индивидуална годишња ефективна доза услед ингестије (Sv), H – годишњи унос црвеног воћа (kg по особи) што у нашем случају износи 54,75 kg, A – концентрација активности Cs-137 (Bq/kg) и DF_{ing} – фактор конверзије дозе за ингестију Cs-137 дефинисан као доза коју прима одрасла особа по јединици уноса радионуклида и њена вредност је $1,3 \times 10^{-8}$ Sv/Bq (погледати поглавље 5.2.3).

8.4 Резултати и дискусија

Мерења су добијена из Лабораторије за заштиту од зрачења и заштиту животне средине „Заштита“, са Института за нуклеарне науке „Винча“. Узорци су били пореклом из различитих земаља Европе, као што су Белгија, Холандија, Украјина, Белорусија итд.

Узорковање је извршено на граничним прелазима од стране сарадника лабораторије, од стране фитосанитарног инспектора присутног на граничном прелазу или је узорак достављен у лабораторију од стране самог корисника. У случају када је узорковање обавио сарадник лабораторије, узорковање је извршено по Упутству за узорковање, документу који је саставни део документације Лабораторије „Заштита“ која је акредитована за обављање ове делатности код Акредитационог тела Србије. Процедура узорковања је у том случају обезбедила да достављени узорак буде репрезентативни представник целокупне количине робе која се испитује.

Укупан број измерених узорака за период 2020-2022 износи 1177, међу којима је у 220 узорака детектован Cs-137. Укупно узорака боровница је било 1027, а у 209 је детектован Cs-137, укупно брусница је износило 58, међу којима је 5 узорака у којима је детектован Cs-137, купина 24, од којих 6 садржи Cs-137 изнад границе детекције.

Минимална детектабилна концентрација је износила од 1,7 Bq/kg, а максимална 210 Bq/kg, за све испитиване узорке. Минимална детектабилна концентрација не зависи од врсте испитиваног воћа већ од ефикасности и типа детектора, масе узорка и времена мерења како се може видети из релације 8.12.

Максимална измерена активност од 210 Bq/kg је пронађена у два узорка боровница, а минимална износи 1,7 Bq/kg. Међу узорцима брусница максимална измерена активност износи 50 Bq/kg, а минимална 7 Bq/kg. Максимална вредност међу узорцима купина износи 11 Bq/kg, а минимална 5 Bq/kg. Из датих података, можемо закључити да 18,71% узорака садржи Cs-137, док у 81,29% овај овај радионуклид није био детектован.

Референтни ниво концентрације активности Cs-137 у Републици Србији је 150 Bq/kg. На основу резултата мерења, пронађено је 19 узорака који премашују референтни ниво, 2

узорка са активношћу једнаком референтном нивоу и 199 узорака у којима измерене активности који не достижу референтни ниво. Дакле, 8,63% премашује референтни ниво, 0,9% достиже референтни ниво и 90,45% узорака не достиже референтни ниво.

У случају да је концентрација активности Cs-137 била изнад референтног нивоа, у закључку Извештаја о мерењу који се издаје коринику, било је јасно наведено да узорак не задовољава критеријуме Правилника о границама садржаја радионуклида у води за пиће, животним намирницама, сточној храни, лековима, праметима опште употребе, грађевинском материјалу и другој роби која се ставља у промет (Службени гласник Р. Србије бр. 36/18) и таква роба се не може увести у земљу нити стављати у промет. Тиме је постигнута заштита опште популације од евентуалних ризика који би проистекли од конзумирања црвеног воћа са повишеном концентрацијом Cs-137.

За рачунање годишњег уноса добијају се следећи резултати. Уколико се претпостави конзумација одрасле особе, која износи 150 g по дану, 54,75 kg/god и ако се претпостави иста количина уноса за све типове црвеног воћа може се применити релација 8.1.13 за израчунавање годишње дозе ингестијом. У табелама су представљени резултати рачунања дозе ингестијом за све узорке у којима је детектовано присуство Cs-137. За максималну измерену активност добија се ефективна доза ингестијом од 149,47 μSv годишње и минимално 1,21 μSv годишње, што задовољава занемарљиве границе ризика прописане Правилником Директората за нуклеарну и радијациону безбедност Србије. Тако да, годишњи унос за одрасле особе износи од 1,21 μSv до 149,47 μSv . Резултати су приложени и табелама 8.1, 8.2 и 8.3 за узорке боровница са детектованим радиоцезијумом, брусницама и купинама.

Табела 8.1 Табела са измереним радиоцезијумом у боровницама

Редни број	Активност А Cs-137 [Bq/kg]	±Δ	Годишњи унос црвеног воћа по особи Н [kg]	Фактор конверзије дозе за ингестију Cs-137 Dfing [Sv/Bq]	Индивидуална годишња ефективна доза услед ингестије Eing [Sv]	Грешка за ефективну дозу услед ингестије Eing [Sv]
5	210	20,0	54,75	1,30E-08	1,49E-04	1,42E-05
6	210	15,0	54,75	1,30E-08	1,49E-04	1,07E-05
7	203	17,0	54,75	1,30E-08	1,44E-04	1,21E-05
8	202	17,0	54,75	1,30E-08	1,44E-04	1,21E-05
9	202	14,0	54,75	1,30E-08	1,44E-04	9,96E-06
10	200	16,0	54,75	1,30E-08	1,42E-04	1,14E-05
11	200	15,0	54,75	1,30E-08	1,42E-04	1,07E-05
12	200	14,0	54,75	1,30E-08	1,42E-04	9,96E-06
13	200	15,0	54,75	1,30E-08	1,42E-04	1,07E-05
14	200	14,0	54,75	1,30E-08	1,42E-04	9,96E-06
15	200	15,0	54,75	1,30E-08	1,42E-04	1,07E-05
16	190	13,0	54,75	1,30E-08	1,35E-04	9,25E-06
17	190	14,0	54,75	1,30E-08	1,35E-04	9,96E-06
18	189	16,0	54,75	1,30E-08	1,35E-04	1,14E-05
19	184	14,0	54,75	1,30E-08	1,31E-04	9,96E-06
20	180	14,0	54,75	1,30E-08	1,28E-04	9,96E-06
21	180	13,0	54,75	1,30E-08	1,28E-04	9,25E-06
22	180	13,0	54,75	1,30E-08	1,28E-04	9,25E-06
23	160	10,0	54,75	1,30E-08	1,14E-04	7,12E-06
24	150	10,0	54,75	1,30E-08	1,07E-04	7,12E-06
25	150	10,0	54,75	1,30E-08	1,07E-04	7,12E-06
26	139	15,0	54,75	1,30E-08	9,89E-05	1,07E-05
27	136	18,0	54,75	1,30E-08	9,68E-05	1,28E-05
28	130	10,0	54,75	1,30E-08	9,25E-05	7,12E-06
29	130	10,0	54,75	1,30E-08	9,25E-05	7,12E-06
30	130	10,0	54,75	1,30E-08	9,25E-05	7,12E-06
31	120	10,0	54,75	1,30E-08	8,54E-05	7,12E-06
32	120	10,0	54,75	1,30E-08	8,54E-05	7,12E-06
33	115	10,0	54,75	1,30E-08	8,19E-05	7,12E-06
34	110	10,0	54,75	1,30E-08	7,83E-05	7,12E-06
35	110	10,0	54,75	1,30E-08	7,83E-05	7,12E-06
36	110	10,0	54,75	1,30E-08	7,83E-05	7,12E-06
37	100	10,0	54,75	1,30E-08	7,12E-05	7,12E-06
38	100	10,0	54,75	1,30E-08	7,12E-05	7,12E-06

39	100	10,0	54,75	1,30E-08	7,12E-05	7,12E-06
40	98	9,0	54,75	1,30E-08	6,98E-05	6,41E-06
41	92	7,0	54,75	1,30E-08	6,55E-05	4,98E-06
42	92	7,0	54,75	1,30E-08	6,55E-05	4,98E-06
43	91	8,0	54,75	1,30E-08	6,48E-05	5,69E-06
44	88	7,0	54,75	1,30E-08	6,26E-05	4,98E-06
45	88	7,0	54,75	1,30E-08	6,26E-05	4,98E-06
46	80	10,0	54,75	1,30E-08	5,69E-05	7,12E-06
47	79	16,0	54,75	1,30E-08	5,62E-05	1,14E-05
48	70	8,0	54,75	1,30E-08	4,98E-05	5,69E-06
49	68	8,0	54,75	1,30E-08	4,84E-05	5,69E-06
50	67	6,0	54,75	1,30E-08	4,77E-05	4,27E-06
51	66	8,0	54,75	1,30E-08	4,70E-05	5,69E-06
52	66	7,0	54,75	1,30E-08	4,70E-05	4,98E-06
53	55	7,0	54,75	1,30E-08	3,91E-05	4,98E-06
54	47	9,0	54,75	1,30E-08	3,35E-05	6,41E-06
55	46	5,0	54,75	1,30E-08	3,27E-05	3,56E-06
56	44	4,0	54,75	1,30E-08	3,13E-05	2,85E-06
57	43	5,0	54,75	1,30E-08	3,06E-05	3,56E-06
58	41	5,0	54,75	1,30E-08	2,92E-05	3,56E-06
59	41	8,0	54,75	1,30E-08	2,92E-05	5,69E-06
60	40	10,0	54,75	1,30E-08	2,85E-05	7,12E-06
61	40	6,0	54,75	1,30E-08	2,85E-05	4,27E-06
62	38	13,0	54,75	1,30E-08	2,70E-05	9,25E-06
63	37	7,0	54,75	1,30E-08	2,63E-05	4,98E-06
64	35	5,0	54,75	1,30E-08	2,49E-05	3,56E-06
65	35	12,0	54,75	1,30E-08	2,49E-05	8,54E-06
66	34	4,0	54,75	1,30E-08	2,42E-05	2,85E-06
67	34	5,0	54,75	1,30E-08	2,42E-05	3,56E-06
68	33	7,0	54,75	1,30E-08	2,35E-05	4,98E-06
69	33	4,0	54,75	1,30E-08	2,35E-05	2,85E-06
70	33	5,0	54,75	1,30E-08	2,35E-05	3,56E-06
71	31	6,0	54,75	1,30E-08	2,21E-05	4,27E-06
72	30	3,0	54,75	1,30E-08	2,14E-05	2,14E-06
73	30	6,0	54,75	1,30E-08	2,14E-05	4,27E-06
74	29	5,0	54,75	1,30E-08	2,06E-05	3,56E-06
75	28	8,0	54,75	1,30E-08	1,99E-05	5,69E-06
76	28	8,0	54,75	1,30E-08	1,99E-05	5,69E-06
77	27	6,0	54,75	1,30E-08	1,92E-05	4,27E-06
78	26	4,0	54,75	1,30E-08	1,85E-05	2,85E-06
79	26	8,0	54,75	1,30E-08	1,85E-05	5,69E-06
80	25	4,0	54,75	1,30E-08	1,78E-05	2,85E-06
81	25	6,0	54,75	1,30E-08	1,78E-05	4,27E-06
82	24	4,0	54,75	1,30E-08	1,71E-05	2,85E-06

83	24	4,0	54,75	1,30E-08	1,71E-05	2,85E-06
84	24	5,0	54,75	1,30E-08	1,71E-05	3,56E-06
85	23	6,0	54,75	1,30E-08	1,64E-05	4,27E-06
86	22	3,0	54,75	1,30E-08	1,57E-05	2,14E-06
87	22	3,0	54,75	1,30E-08	1,57E-05	2,14E-06
88	21	6,0	54,75	1,30E-08	1,49E-05	4,27E-06
89	20	3,0	54,75	1,30E-08	1,42E-05	2,14E-06
90	20	3,0	54,75	1,30E-08	1,42E-05	2,14E-06
91	20	4,0	54,75	1,30E-08	1,42E-05	2,85E-06
92	20	6,0	54,75	1,30E-08	1,42E-05	4,27E-06
93	20	4,0	54,75	1,30E-08	1,42E-05	2,85E-06
94	19	2,0	54,75	1,30E-08	1,35E-05	1,42E-06
95	19	5,0	54,75	1,30E-08	1,35E-05	3,56E-06
96	19	3,0	54,75	1,30E-08	1,35E-05	2,14E-06
97	19	5,0	54,75	1,30E-08	1,35E-05	3,56E-06
98	18	5,0	54,75	1,30E-08	1,28E-05	3,56E-06
99	18	3,0	54,75	1,30E-08	1,28E-05	2,14E-06
100	18	6,0	54,75	1,30E-08	1,28E-05	4,27E-06
101	18	5,0	54,75	1,30E-08	1,28E-05	3,56E-06
102	17	4,0	54,75	1,30E-08	1,21E-05	2,85E-06
103	17	5,0	54,75	1,30E-08	1,21E-05	3,56E-06
104	17	3,0	54,75	1,30E-08	1,21E-05	2,14E-06
105	17	5,0	54,75	1,30E-08	1,21E-05	3,56E-06
106	17	4,0	54,75	1,30E-08	1,21E-05	2,85E-06
107	16	5,0	54,75	1,30E-08	1,14E-05	3,56E-06
108	16	2,0	54,75	1,30E-08	1,14E-05	1,42E-06
109	15	3,0	54,75	1,30E-08	1,07E-05	2,14E-06
110	15	4,0	54,75	1,30E-08	1,07E-05	2,85E-06
111	14	5,0	54,75	1,30E-08	9,96E-06	3,56E-06
112	13	5,0	54,75	1,30E-08	9,25E-06	3,56E-06
113	13	2,0	54,75	1,30E-08	9,25E-06	1,42E-06
114	13	4,0	54,75	1,30E-08	9,25E-06	2,85E-06
115	13	2,0	54,75	1,30E-08	9,25E-06	1,42E-06
116	12	2,0	54,75	1,30E-08	8,54E-06	1,42E-06
117	12	2,0	54,75	1,30E-08	8,54E-06	1,42E-06
118	12	6,0	54,75	1,30E-08	8,54E-06	4,27E-06
119	11	2,0	54,75	1,30E-08	7,83E-06	1,42E-06
120	11	4,0	54,75	1,30E-08	7,83E-06	2,85E-06
121	11	6,0	54,75	1,30E-08	7,83E-06	4,27E-06
122	11	4,0	54,75	1,30E-08	7,83E-06	2,85E-06
123	10,8	1,3	54,75	1,30E-08	7,69E-06	9,25E-07
124	10	2,0	54,75	1,30E-08	7,12E-06	1,42E-06
125	10	4,0	54,75	1,30E-08	7,12E-06	2,85E-06
126	10	6,0	54,75	1,30E-08	7,12E-06	4,27E-06

127	10	6,0	54,75	1,30E-08	7,12E-06	4,27E-06
128	9	2,0	54,75	1,30E-08	6,41E-06	1,42E-06
129	9	3,0	54,75	1,30E-08	6,41E-06	2,14E-06
130	9	4,0	54,75	1,30E-08	6,41E-06	2,85E-06
131	9	3,0	54,75	1,30E-08	6,41E-06	2,14E-06
132	9	3,0	54,75	1,30E-08	6,41E-06	2,14E-06
133	9	2,0	54,75	1,30E-08	6,41E-06	1,42E-06
134	8,3	3,5	54,75	1,30E-08	5,91E-06	2,49E-06
135	8	2,0	54,75	1,30E-08	5,69E-06	1,42E-06
136	8	3,0	54,75	1,30E-08	5,69E-06	2,14E-06
137	8	2,0	54,75	1,30E-08	5,69E-06	1,42E-06
138	7,5	2,4	54,75	1,30E-08	5,34E-06	1,71E-06
139	7,5	1,4	54,75	1,30E-08	5,34E-06	9,96E-07
140	7	3,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	2,14E-06
141	7	3,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	2,14E-06
142	7	2,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	1,42E-06
143	7	2,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	1,42E-06
144	7	2,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	1,42E-06
145	7	2,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	1,42E-06
146	7	2,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	1,42E-06
147	7	3,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	2,14E-06
148	7	3,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	2,14E-06
149	7	3,0	54,75	1,30E-08	4,98E-06	2,14E-06
150	6,3	3,0	54,75	1,30E-08	4,48E-06	2,14E-06
151	6	2,0	54,75	1,30E-08	4,27E-06	1,42E-06
152	6	1,3	54,75	1,30E-08	4,27E-06	9,25E-07
153	6	3,0	54,75	1,30E-08	4,27E-06	2,14E-06
154	6	1,0	54,75	1,30E-08	4,27E-06	7,12E-07
155	6	3,0	54,75	1,30E-08	4,27E-06	2,14E-06
156	6	2,0	54,75	1,30E-08	4,27E-06	1,42E-06
157	6	2,0	54,75	1,30E-08	4,27E-06	1,42E-06
158	5,5	1,5	54,75	1,30E-08	3,91E-06	1,07E-06
159	5,5	2,9	54,75	1,30E-08	3,91E-06	2,06E-06
160	5,4	1,2	54,75	1,30E-08	3,84E-06	8,54E-07
161	5,3	1,4	54,75	1,30E-08	3,77E-06	9,96E-07
162	5,2	1,5	54,75	1,30E-08	3,70E-06	1,07E-06
163	5,2	1,6	54,75	1,30E-08	3,70E-06	1,14E-06
164	5,2	1,6	54,75	1,30E-08	3,70E-06	1,14E-06
165	5,2	2,5	54,75	1,30E-08	3,70E-06	1,78E-06
166	5,2	1,3	54,75	1,30E-08	3,70E-06	9,25E-07
167	5,1	1,6	54,75	1,30E-08	3,63E-06	1,14E-06
168	5	1,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07
169	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
170	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06

171	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
172	5	1,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07
173	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
174	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
175	5	1,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07
176	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
177	5	1,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07
178	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
179	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
180	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
181	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
182	5	1,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07
183	5	2,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	1,42E-06
184	5	1,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07
185	5	1,0	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07
186	4,9	1,6	54,75	1,30E-08	3,49E-06	1,14E-06
187	4,9	1,2	54,75	1,30E-08	3,49E-06	8,54E-07
188	4,8	1,1	54,75	1,30E-08	3,42E-06	7,83E-07
189	4,7	1,4	54,75	1,30E-08	3,35E-06	9,96E-07
190	4,6	1,1	54,75	1,30E-08	3,27E-06	7,83E-07
191	4,5	1,6	54,75	1,30E-08	3,20E-06	1,14E-06
192	4,5	1,3	54,75	1,30E-08	3,20E-06	9,25E-07
193	4,5	1,6	54,75	1,30E-08	3,20E-06	1,14E-06
194	4,5	1,3	54,75	1,30E-08	3,20E-06	9,25E-07
195	4,4	1,3	54,75	1,30E-08	3,13E-06	9,25E-07
196	4,2	1,1	54,75	1,30E-08	2,99E-06	7,83E-07
197	4,1	1,3	54,75	1,30E-08	2,92E-06	9,25E-07
198	4	1,0	54,75	1,30E-08	2,85E-06	7,12E-07
199	4	0,7	54,75	1,30E-08	2,85E-06	4,98E-07
200	4	1,0	54,75	1,30E-08	2,85E-06	7,12E-07
201	4	1,0	54,75	1,30E-08	2,85E-06	7,12E-07
202	3,8	2,0	54,75	1,30E-08	2,70E-06	1,42E-06
203	3,8	1,3	54,75	1,30E-08	2,70E-06	9,25E-07
204	3,1	1,5	54,75	1,30E-08	2,21E-06	1,07E-06
205	2,8	1,3	54,75	1,30E-08	1,99E-06	9,25E-07
206	2,7	1,3	54,75	1,30E-08	1,92E-06	9,25E-07
207	2,1	0,9	54,75	1,30E-08	1,49E-06	6,41E-07
208	2	0,6	54,75	1,30E-08	1,42E-06	4,27E-07
209	1,7	0,8	54,75	1,30E-08	1,21E-06	5,69E-07

Табела 8.2 Табела са измереним радиоцеизијумом у брусницама

Редни број	Активност А Cs-137 [Bq/kg]	±Δ	Годишњи унос црвеног воћа по особи Н [kg]	Фактор конверзије дозе за ингестију Cs-137 D _{фing} [Sv/Bq]	Индивидуална годишња ефективна доза услед ингестије E _{ing} [Sv]	Грешка за ефективну дозу услед ингестије E _{ing} [Sv]
1	50	5	54,75	1,30E-08	3,56E-05	3,56E-06
2	37	5	54,75	1,30E-08	2,63E-05	3,56E-06
3	18	4	54,75	1,30E-08	1,28E-05	2,85E-06
4	16	3	54,75	1,30E-08	1,14E-05	2,14E-06
5	7	2	54,75	1,30E-08	4,98E-06	1,42E-06

Табела 8.3 Табела са измереним радиоцеизијумом у купинама

Редни број	Активност А Cs-137 [Bq/kg]	±Δ	Годишњи унос црвеног воћа по особи Н [kg]	Фактор конверзије дозе за ингестију Cs-137 D _{фing} [Sv/Bq]	Индивидуална годишња ефективна доза услед ингестије E _{ing} [Sv]	Грешка за ефективну дозу услед ингестије E _{ing} [Sv]
1	11	4	54,75	1,30E-08	7,83E-06	2,85E-06
2	11	3	54,75	1,30E-08	7,83E-06	2,14E-06
3	10	2	54,75	1,30E-08	7,12E-06	1,42E-06
4	10	2	54,75	1,30E-08	7,12E-06	1,42E-06
5	8	3	54,75	1,30E-08	5,69E-06	2,14E-06
6	5	1	54,75	1,30E-08	3,56E-06	7,12E-07

9 Закључак

Као физиони производи као последица акцидента у Чернобилу и нуклеарних тестова у природи се данас налази радиоактивни Cs-137 са периодом полураспада од 30,18 год. Лако се апсорбује у материји и дуго опстаје тако апсобован у намирницама које се конзумирају.

Овај рад представља испитивање садржаја Cs-137 у увезеном црвеном воћу из Европе и сигурност конзумирања. Испитано је 1109 узорка на Институту за нуклеарне науке "Винча" у периоду од 2020. године до 2022. године. Концентрација депонованог Cs-137 је испитана гама спектрометријом. Гама спектрометријом на три HPGe детектора, мерењем активности и годишњег уноса, резултати су следећи:

Укупан број измерених узорка за период 2020-2022 износи 1177, међу којима је у 220 узорка детектован Cs-137. Укупно узорка боровница је било 1027, а у 209 је детектован Cs-137, укупно брусница је износило 58, међу којима је 5 узорка у којима је детектован Cs-137, купина 24, од којих 6 садржи Cs-137 изнад границе детекције.

- Минимална детектабилна концентрација је износила од 1,7 Bq/kg, а максимална 210 Bq/kg, за све испитиване узорке. Минимална детектабилна концентрација не зависи од врсте испитиваног воћа већ од ефикасности и типа детектора, масе узорка и времена мерења како се може видети из релације 8.12.
- Максимална измерена активност од 210 Bq/kg је пронађена у два узорка боровница, а минимална износи 1,7 Bq/kg. Међу узорцима брусница максимална измерена активност износи 50 Bq/kg, а минимална 7 Bq/kg. Максимална вредност међу узорцима купина износи 11 Bq/kg, а минимална 5 Bq/kg. Из датих података, можемо закључити да 18,71% узорка садржи Cs-137, док у 81,29% овај овај радионуклид није био детектован.
- Референтни ниво концентрације активности Cs-137 у Републици Србији је 150 Bq/kg. На основу резултата мерења, пронађено је 19 узорка који премашују референтни ниво, 2 узорка са активношћу једнаком референтном нивоу и 199 узорка у којима измерене активности који не достижу референтни ниво. Дакле, 8,63% премашује референтни ниво, 0,9% достиже референтни ниво и 90,45% узорка не достиже референтни ниво.

За рачунање годишњег уноса добијају се следећи резултати. Уколико се претпостави конзумација одрасле особе, која износи 150 g по дану, 54,75 kg/god и ако се претпостави иста количина уноса за све типове црвеног воћа може се применити релација 8.1.13 за

израчунавање годишње дозе ингестијом. У табелама су представљени резултати рачунања дозе ингестијом за све узорке у којима је детектовано присуство Cs-137. За максималну измерену активност добија се ефективна доза ингестијом од 149,47 μSv годишње и минимално 1,21 μSv годишње, што задовољава занемарљиве границе ризика прописане Правилником Директората за нуклеарну и радијациону безбедност Србије. Тако да, годишњи унос за одрасле особе износи од 1,21 μSv до 149,47 μSv . Резултати су приложени и табелама 8.1, 8.2 и 8.3 за узорке боровница са детектованим радиоцезијумом, брусницама и купинама.

Узорци су увезени из Европе, али највећим делом из Белорусије. Како радиоактивни Cs има период полураспада 30,0 год, и представља фисиони продукт, можемо закључити да су ово последице нуклеарних катастрофа XX века.

10 Биографија



Јована Новаковић је рођена 30. октобра 1995. у Београду. Основну и средњу школу је завршила у родном месту у Младеновцу. Основне академске студије Опште физике је завршила на Универзитету у Крагујевцу, на департману за физику, док је мастер студије медицинске физике завршила на Универзитету у Новом Саду, на департману за физику. Ради као наставник физике у основној школи.

11 Референце

1. Белешке са предавања Атомске физике код проф Драгослава Никезића. 2018.
2. Dmitri Mendeleev | Biography, Periodic Table, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Dmitri-Mendeleev>
3. Pierre Curie | Awards, Biography, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Pierre-Curie>
4. Marie Curie | Biography, Nobel Prize, Accomplishments, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Marie-Curie>
5. Henri Becquerel | French Physicist & Radioactivity Pioneer | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Henri-Becquerel>
6. What is the decay equation of cesium 137? | Socratic [Internet]. [cited 2023 Aug 25]. Available from: <https://socratic.org/questions/what-is-the-decay-equation-of-cesium-137>
7. What is XRF? – Amptek – X-Ray Detectors and Electronics [Internet]. [cited 2023 Oct 15]. Available from: <https://www.amptek.com/resources/xrf>
8. Radionuclide Basics: Cesium-137 | US EPA [Internet]. [cited 2023 Apr 12]. Available from: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-cesium-137>
9. CDC Radiation Emergencies | Radioisotope Brief: Cesium-137 (Cs-137) [Internet]. [cited 2023 Apr 12]. Available from: <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/isotopes/cesium.htm>
10. Nuclear weapon - The Soviet Union | Britannica [Internet]. [cited 2023 Apr 12]. Available from: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-weapon/The-Soviet-Union>
11. Bauer S, Gusev B, Belikhina T, Moldagaliev T, Apsalikov K. The Legacies of Soviet Nuclear Testing in Kazakhstan. Fallout, Public Health and Societal Issues. [Internet]. Vol. 19, Radioactivity in the Environment. Elsevier; 2013. 241–258 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-045015-5.00014-9>
12. Timeline of the Nuclear Age [1960s] [Internet]. [cited 2023 Apr 12]. Available from: <https://www.atomicarchive.com/resources/timeline/timeline1960.html>
13. End Nuclear Tests Day - History | United Nations [Internet]. [cited 2023 Apr 12]. Available from: <https://www.un.org/en/observances/end-nuclear-tests-day/history>
14. Lukashenko S, Kabdyrakova A, Lind OC, Gorlachev I, Kunduzbayeva A, Kvochkina T, et al. Radioactive particles released from different sources in the Semipalatinsk Test Site. J Environ Radioact [Internet]. 2020;216(February):106160. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106160>
15. Gusev BI, Abylkassimova ZN, Apsalikov KN. The Semipalatinsk nuclear test site: A first assessment of the radiological situation and the test-related radiation doses in the surrounding territories. Radiat Environ Biophys. 1997;36(3):201–4.
16. Threshold Test Ban Treaty (TTBT) | Arms Control Association [Internet]. [cited 2023 Apr 18]. Available from: <https://www.armscontrol.org/treaties/threshold-test-ban-treaty>
17. Threshold Test Ban Treaty (1974) | Nuclear Arms Control Treaties [Internet]. [cited 2023 Apr 18]. Available from: <https://www.atomicarchive.com/resources/treaties/ttbt.html>
18. Test Ban Treaty (1963) | National Archives [Internet]. [cited 2023 Apr 18]. Available from: <https://www.archives.gov/milestone-documents/test-ban-treaty>
19. KHALTURIN VI, RAUTIAN TG, RICHARDS PG, LEITH WS. A Review of Nuclear Testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955–1990. Sci Glob Secur. 2005;13(1–2):1–42.
20. Carter MW, Moghissi AA. Three Decades of nuclear testing. Health Phys. 1977;33(1):55–71.
21. Aoyama M. EVIDENCE OF STRATOSPHERIC FALLOUT OF CAESIUM ISOTOPES FROM THE CHERNOBYL ACCIDENT. 1988;15(4):327–30.

22. Scheer A, Kruppke H, Heib R. Atmospheric Nuclear Tests Environmental and Human Consequences [Internet]. Vol. 35. 2001. 63–68 p. Available from: http://download.springer.com/static/pdf/185/bfm%253A978-3-642-56668-4%252F1.pdf?auth66=1401995374_4d363c462609ae19e3de18b0ee51ef07&ext=.pdf
23. Saenko V, Ivanov V, Tsyb A, Bogdanova T, Tronko M, Demidchik YU, et al. The Chernobyl Accident and its Consequences. Clin Oncol [Internet]. 2011;23(4):234–43. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clon.2011.01.502>
24. Lujanienė G, Lujanas V, Jankunaite D, Ogorodnikov BI, Mastauskas A, Ladygiene R. Speciation of radionuclides of the Chernobyl origin in aerosol and soil samples. Czechoslov J Phys. 1999;49(S1):107–14.
25. Kagan LM, Kadatsky VB. Depth migration of chernobyl originated ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in soils of Belarus. J Environ Radioact. 1996;33(1):27–39.
26. Pochin EE. Links in the Transmission of Radionuclides Through Food Chains. Radionuclides Food Chain. 1988;22–31.
27. Russell RS. Radioactivity in food. Nutr Food Sci. 1972;72(2):14–6.
28. Radi IM, Nivoa P. O Granicama Izlaganja Jonizujućim Zračenjima. 2011;
29. Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti [Internet]. [cited 2023 Oct 23]. Available from: <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-radijacionoj-i-nuklearnoj-sigurnosti-i-bezbednosti.html>
30. Lica K, Životne RI, Sprovođenja SIN, Radi IM, Nivoa P. O Granicama Radioaktivne. 2011;
31. Lerch H, Jigalin A. Nuclear medicine: Medical technology research. NuklearMedizin. 2005;44(6):267–71.
32. Petrović B. Fizičke osnove radioterapije. 2018.
33. Muhammad W, Hussain A, Maqbool M. Basic Concepts in Radiation Dosimetry Chapter 2 Basic Concepts in Radiation Dosimetry. 2017;3(February 2018):263–79.
34. Semat H. (1962) Introduction to atomic and nuclear physics: 4th ed. New York: Holt, Rinehart and Winston. 1962;
35. Dunn WL, McGregor DS. Gamma-ray detectors. Handb Part Detect Imaging. 2012;413–51.
36. Николић ЈДК. Примена аналитичког, експерименталног, полуемпиријског и Монте Карло метода за калибрацију ефикасности HPGe детектора у гама спектрометрији узорака из животне средине. 2015;
37. Tools C. Genie™ 2000 Spectroscopy Software. Spectroscopy. 2000;
38. John Dalton | Biography, Discoveries, Atomic Model, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/John-Dalton>
39. J.J. Thomson | Biography, Nobel Prize, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/J-J-Thomson>
40. Ernest Rutherford | Accomplishments, Atomic Theory, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Ernest-Rutherford>
41. Niels Bohr | Biography, Education, Accomplishments, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Niels-Bohr>
42. Erwin Schrodinger | Biography, Atomic Model, Cat, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Erwin-Schrodinger>
43. Wilhelm Conrad Roentgen | Biography, Discovery, X-Rays, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Wilhelm-Rontgen>
44. David M. Jameson. Introduction to Fluorescence [Internet]. 2014 [cited 2023 Aug 26]. Available from: https://books.google.rs/books?hl=sr&lr=&id=SI-lAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=fluorescence&ots=bA2kyWJbdk&sig=_6aQBLbNJ

- VYb7UULKjOe444d6Ds&redir_esc=y#v=onepage&q=fluorescence&f=false
45. Phosphorescence | Chemiluminescence, Bioluminescence, Fluorescence | Britannica [Internet]. [cited 2023 Aug 26]. Available from: <https://www.britannica.com/science/phosphorescence>
 46. Alpha particle | Charge, Mass, & Definition | Britannica [Internet]. [cited 2023 Aug 26]. Available from: <https://www.britannica.com/science/alpha-particle>
 47. Beta particle | physics | Britannica [Internet]. [cited 2023 Aug 26]. Available from: <https://www.britannica.com/science/beta-particle>
 48. Gamma ray | Definition, Uses, Wavelength, Production, Examples, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Aug 26]. Available from: <https://www.britannica.com/science/gamma-ray>
 49. Joseph Stalin | Biography, World War II, Death, & Facts | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Joseph-Stalin>
 50. Igor Vasilyevich Kurchatov | Soviet Physicist & Nuclear Scientist | Britannica [Internet]. [cited 2023 Dec 2]. Available from: <https://www.britannica.com/biography/Igor-Vasilyevich-Kurchatov>

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број:

RBR

Идентификациони број:

IBR

Тип документације:

Монографска документација

TD

Тип записа:

Текстуални штампани материјал

TZ

Врста рада:

Мастер рад

VR

Аутор:

Јована Новаковић

AU

Ментор:

Проф др Наташа Тодоровић, редовни професор

Др Јелена Крнета Николић, виши научни сарадник

MN

Наслов рада:

Садржај произведеног радионуклида Cs-137 и процена дозе

ингестијом услед конзумирања црвеног воћа увезеног из Европе

NR

Језик публикације:

српски (ћирилица)

JR

Језик извода:

српски/енглески

JI

Земља публикавања:

Србија

ZP

Уже географско подручје:

Војводина

UGP

Година: 2023

GO

Издавач: Ауторски репринт

IZ

Место и адреса: Природно-математички факултет, Трг Доситеја Обрадовића 4,
Нови Сад

MA

Физички опис рада: Број поглавља: 9

FO

Број страна: 99

Број табела: 15

Број слика: 29

Број референци: 50

Научна област:

Физика

NO

Научна дисциплина:

Медицинска физика

ND

Предметна одредница/кључне речи:

радиоактивност, Cs-137, биолошко дејство, гама зраци,
полупроводнички детектори, HPGe, калибрација

PO**UDK**

Чува се:

Библиотека департмана за физику, ПМФ-а у Новом Саду

ЃU

Важна напомена:

нема

VN

Извод:

У овом мастер раду извршена је процена садрђаја радиоцезијума у
црвеном воћу увезеном из Европе и процена дозе унесене

конзумирањем истог.

IZ

Датум прихватања теме од НН већа:

DP

Датум одбране: 1. децембар 2023.

DO

Чланови комисије:

КО

Председник: Проф др Јована Николов, ванредни професор,
Универзитет Нови Сад, Природно математички факултет

Члан: Проф др Наташа Тодоровић, редовни професор
Универзитет Нови Сад, Природно математички факултет

Члан: Др Јелена Крнета Николић, виши научки сарадник
Универзитет Београд, Институт за нуклеарне науке „Винча“

Члан: Проф др Ивана Стојковић, ванредни професор
Универзитет Нови Сад, Факултет техничких наука

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Contet code:

Master thesis

CC

Author:

Jovana Novaković

AU

Mentor/comentor:

prof dr Nataša Todorović

dr Jelena Krneta Nikolić

MN

Title:

The contet of the produced radionuclide Cs-137 and the cost of the dose
by ingestion due to the consumption of red fruit imortet from Europe

TI

Language of text:

serbian (cyrillic)

LT

Language of absract:

serbian/english

LA

Countryof publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year: 2023

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4,
Novi Sad

PP

Physical description: Number of chapters: 9

PD

Number of pages: 99

Number of tables: 15

Number of figures: 29

Number of references: 50

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Medical physics

SD

Subject/ Key words:

radioactivity, Cs-137, biological effects, gamma rays,

Semi conductor gamma detectors, HPGe, calibration

SKW**UC**

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića

HD

Note:

none

N

Abstract:

In this master thesis, an assessment of the content of radiocesium in red fruit imported from Europe and estimation of the ingested dose introduced

by consuming it.

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

December 1st 2023.

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Prof dr Jovana Nikolov, Associate Professor,
University of Novi Sad, Faculty of Science and Mathematics

Member:

Prof dr Nataša Todorović, full professor
University of Novi Sad, Faculty of Science and Mathematics

Member:

Dr Jelena Krneta Nikolić, senior research associate
University of Belgrade, Institute for nuclear sciences „Vinča“

Member:

Prof dr Ивана Стојковић, Associate Professor,
University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences